

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie civil

**PROBLÈMES DE GONFLEMENT DE REMBLAIS DE FONDATION LIÉS À LA
PYRITE : CARACTÉRISATION DU POTENTIEL EXPANSIF EN LABORATOIRE**

Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées
Spécialité : génie civil

Gilbert Nkurunziza

Sherbrooke (Québec), CANADA

Décembre 2000



**National Library
of Canada**

**Acquisitions and
Bibliographic Services**

**395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

**Bibliothèque nationale
du Canada**

**Acquisitions et
services bibliographiques**

**395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-67702-8

Canada

RÉSUMÉ

Des granulats pyriteux provenant de roches sédimentaires peuvent être sujets à des expansions après leur mise en place dans les remblais de fondation et, par conséquent, provoquer des soulèvements de dalles avec, dans certains cas, des répercussions sur les structures. Ces cas s'appliquent à des régions où la pénurie de granulats de qualité nécessite l'utilisation des matériaux disponibles.

Les gonflements observés sont imputés essentiellement à l'oxydation des sulfures, particulièrement la pyrite, la pyrrhotite et la chalcopyrite présentes dans les concassés induisant après neutralisation de l'acide sulfurique formé à la formation du gypse tenu en grande partie pour responsable de l'accroissement volumique. Dans les cas les plus sévères, on assiste à un phénomène de sulfatation du béton de la dalle provoquant un gonflement additionnel au gonflement simple du remblai. Lorsque les forces exercées par l'expansion au sein du remblai sont considérables, même de faibles dommages sont irréversibles. À ces inconvénients s'associent les conséquences de la réhabilitation et de l'évaluation foncière. Les dégâts causés par ce problème sont très nombreux, surtout dans la région de Montréal où ils sont évalués à plus d'une centaine de millions de dollars selon des estimations récentes. Cependant, ces cas de gonflement peuvent aussi exister dans d'autres régions sans qu'on attribue les désordres apparents à l'oxydation des sulfures présents dans les concassés de remblais de fondation.

Le phénomène de gonflement des remblais pyriteux est relativement complexe et plusieurs aspects suscitent encore des questions qui demeurent relativement obscures. Des difficultés subsistent en ce qui concerne la fiabilité des moyens de prévention et de correction, le diagnostic parfois incertain pour les bâtiments existants et surtout l'absence d'un essai normalisé permettant l'évaluation du potentiel expansif des granulats pyriteux. Bien qu'il soit théoriquement envisageable de neutraliser le phénomène d'oxydation sans avoir à enlever tout le remblai, aucun procédé remédiateur n'est disponible. Les acquis scientifiques récents se limitent à situer le problème sur une échelle de risque allant d'un potentiel expansif nul à un très fort potentiel, avec entre les deux, une zone grise. Cette classification pénalise beaucoup les carrières produisant les

concassés appartenant à la zone grise; cet état risque d'engendrer une pénurie de matériaux granulaires dans les régions où uniquement ce type de granulats est disponible.

Le but de ce travail est donc d'élaborer un essai permettant d'évaluer le potentiel de gonflement des matériaux granulaires destinés aux remblais de fondation à l'aide d'un dispositif expérimental développé à l'Université de Sherbrooke. Dans cette optique, un programme d'évaluation des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des granulats provenant de divers horizons de la province du Québec a été un préalable pour atteindre nos objectifs. À l'aide d'un dispositif expérimental conçu à l'Université de Sherbrooke, le potentiel de gonflement a été évalué dans un milieu où les conditions environnementales sont similaires aux conditions réelles rencontrées au niveau d'un remblai de fondation en contact avec une dalle chauffée. Les résultats acquis ont permis de dégager une corrélation entre les différentes caractéristiques intrinsèques et le potentiel expansif des granulats retenus dans le cadre de cette étude.

ABSTRACT

Pyritous aggregates originating from sedimentary rocks may be subject to expansions following their installation in the subbase foundation and then may cause slabs having, in some cases, consequences on the structures. This situation occurs in areas where the lack of prime aggregates requires the use of local materials.

Swellings are primarily related to the oxidation of sulphides particularly to the pyrite, pyrrhotite and chalcopyrite present in aggregates. Sulphuric acid is formed and reacts as the result of oxidation to produce gypsum which is responsible for the voluminal increase. In most severe cases, the phenomenon of concrete sulphate attack causes an additional swelling. When the pressures exerted by the expansion are considerable, even weak damage may be irreversible with the consequences of the rehabilitation and the land evaluation. The damages related to this problem are very important, especially in the Montreal area, where they have been evaluated with more than one hundred millions dollars according to recent estimates. However, these cases of swelling can also exist in different areas without allotting the apparent damage to the oxidation of sulphides found in aggregates used in rockfill.

The swelling phenomenon of the pyritous contained in the aggregates is relatively complex and some questions still unanswered. Difficulties remain regarding the reliability of the prevention processes, the dubious diagnosis for the existing buildings and the absence of a standardized test allowing the evaluation of the expansive potential of the pyritous aggregates. Although it is theoretically possible to neutralize the phenomenon of oxidation without having to remove all the rockfill, no reliable preventive process has been yet found. The new preventive methods are limited to set the problem on a scale of risk which starts from a null potential to a very strong potential, with between them, a gray zone. These methods penalize greatly the quarries located in the risky areas; this situation is likely to generate a granular material shortage in the future.

The aim of this work is to develop a test method for the evaluation of swelling potential of granular materials. This will be achieved by using an experimental device developed at the Université de Sherbrooke. Accordingly, a program of evaluation of the physicochemical and

mechanical characteristics of the aggregates recovered from various horizons of the Province of Quebec was carried out. Using an experimental set-up designed at the Université de Sherbrooke, the swelling potential was evaluated where the environmental conditions were similar to the field conditions met in rockfill in contact with a heated concrete slab. The results obtained through this project allowed us to set a correlation between the various intrinsic characteristics and the expansive potential of the aggregates tested in this study.

REMERCIEMENTS

L'accomplissement de ce travail a été possible grâce à l'assistance de plusieurs personnes. Je tiens donc à leur exprimer toute ma gratitude.

Mes très vifs remerciements sont adressés premièrement au Dr Gérard Ballivy, professeur titulaire au département de génie civil de l'Université de Sherbrooke et directeur de mon projet de recherche, pour m'avoir permis de faire une maîtrise au sein de son équipe de recherche, dans laquelle j'ai acquis une grande expérience de recherche. En plus de ses conseils scientifiques très enrichissants, il a mis à ma disposition tous les outils nécessaires à l'exécution de mes travaux de recherche.

Je voudrais également rendre hommage au D. Sc. A. Achour Bellaloui, professionnel de recherche au sein du groupe de Mécanique des Roches et de Géologie Appliquée de l'Université de Sherbrooke, avec qui j'ai eu la chance d'avoir d'enrichissantes discussions scientifiques tout au long de ma maîtrise. Je tiens à le remercier sincèrement pour ses judicieux conseils, son expertise et son enthousiasme.

Je voudrais aussi remercier Georges Lalonde, Danick Charbonneau, Martin Lizotte et Nicole Laverdière, du laboratoire de Mécanique des Roches et de Géologie Appliquée, pour leur collaboration et leur soutien.

Une attention toute particulière s'adresse à ma chère famille, mon épouse Olive, mes enfants Elyse et Yvan qui m'ont toujours supporté moralement malgré la longue distance géographique qui nous séparait pendant la réalisation de ce mémoire.

Je remercie également les autorités du Programme canadien des bourses de la francophonie qui ont financé mes études de maîtrise et la société d'Habitation du Québec qui a participé financièrement au développement et à la conduite des essais qui ont nécessité beaucoup d'énergie des membres du laboratoire.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
1.1	Défis à relever	2
1.2	Objectifs	2
2	REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	3
2.1	Problématique associée aux remblais pyriteux	3
2.1.1	Historique du problème	3
2.2	Géologie	8
2.2.1	Influence de la minéralogie et de la texture des roches	8
2.2.2	Géologie de la Plate-Forme du Saint-Laurent et des Appalaches	10
2.2.3	Formation de la pyrite	17
2.2.4	Morphologie des sulfures métalliques	17
3	MÉCANISMES DE RÉACTION ET DE GONFLEMENT	19
3.1	Déformation structurale des bâtiments due à la problématique de la pyrite	19
3.2	Réactivité des sulfures métalliques contenus dans les granulats	21
3.2.1	Oxydation des sulfures et formation de l'acide sulfurique	22
3.2.2	Réactions entre l'acide sulfurique formé et les carbonates présents	24
3.2.3	Gonflement du remblai et sulfatation de la dalle de béton	25
3.2.4	Contribution des silico-aluminates au potentiel expansif	28
3.3	Facteurs influençant l'oxydation et l'expansion	30
3.3.1	Influence de la population bactérienne	30
3.3.2	Influence du pH	32
3.3.3	Influence de la température	33
3.3.4	Influence du taux d'oxygénation et du degré de saturation	34
3.3.5	Influence de la morphologie et de la surface spécifique des sulfures	37
3.3.6	Influence de la localisation des pyrites dans les granulats	38

4	MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE.....	40
4.1	Approche générale.....	40
4.2	Étude sur roche et granulats.....	41
4.2.1	Caractérisation physico-mécanique.....	43
4.2.2	Caractérisation chimique et minéralogique.....	43
4.3	Mesure du potentiel expansif des concassés.....	44
4.4	Analyse des résultats.....	44
5	CARACTÉRISATION DES GRANULATS UTILISÉS POUR LES ESSAIS DE GONFLEMENT.....	45
5.1	Analyse chimique des granulats.....	46
5.1.1	Détermination du potentiel net de neutralisation.....	46
5.1.2	Détermination du potentiel de génération de sulfates.....	47
5.2	Analyse par diffraction des rayons X.....	49
5.2.1	Principe de la diffraction des rayons X.....	49
5.2.2	Préparation de la poudre.....	50
5.2.3	Analyse des spectres.....	50
5.3	Essais physico-mécaniques des granulats étudiés.....	53
5.3.1	Granulométrie.....	53
5.3.2	Densité et adsorption.....	58
5.3.3	Désagrégation par une solution de sulfate de magnésium.....	59
5.3.4	Résistance mécanique des granulats.....	61
5.3.5	Caractéristiques mécaniques de la roche de l'échantillon ME.....	62
5.4	Effet du compactage sur l'oxydation de la pyrite.....	66
5.4.1	Détermination de la teneur en eau par essai Proctor.....	67
5.5	Discussion des résultats des analyses physiques, chimiques et mécaniques.....	72
6	DÉTERMINATION DU POTENTIEL EXPANSIF DES CONCASSÉS.....	75
6.1	Objectifs de travail.....	75
6.2	Hypothèses de travail.....	76
6.3	Dispositif expérimental.....	76

6.3.1	Caractéristiques des moules utilisés.....	78
6.3.2	Bac contenant de l'eau déionisée.....	79
6.3.3	Système d'acquisition de données.....	80
6.3.4	Essai d'expansion en chambre humide.....	80
6.3.5	Essai d'expansion à température ambiante.....	81
7	RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION.....	83
7.1	Mesures de gonflement et interprétation.....	83
7.1.1	Influence des bactéries et de la température sur la réactivité.....	83
7.1.2	Influence de l'humidité et de la surface spécifique sur la réactivité.....	87
7.1.3	Courbes d'expansion des concassés A, B, C, D, E, F, ME et P.....	89
7.1.4	Cinétique expansive des shales A et P.....	92
7.2	Récapitulatif des résultats obtenus.....	94
	CONCLUSION.....	101
	RECOMMANDATIONS.....	103
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	104
	ANNEXE A DÉFORMATIONS STRUCTURALES DUES AU ROC ARGILEUX	
	DE FONDATION :CAS DU BURUNDI.....	111
	ANNEXE B NORME PROPOSÉE POUR LES ESSAIS DE GONFLEMENT DES	
	MATÉRIAUX GRANULAIRES PYRITEUX "EGUS"	122
	ANNEXE C SPECTRES DE DIFFRACTION DES RAYONS X.....	129
	ANNEXE D PROCÉDURE DE CARACTÉRISATION DES GRANULATS	
	POTENTIELLEMENT GONFLANTS.....	134

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 2.1 Provinces géologiques du Québec.....	11
Figure 2.2 Carte géologique de la Plate-forme du Saint-Laurent Appalaches.....	12
Figure 2.3 Coupe à la hauteur Montréal-Cantons de l'Est.....	13
Figure 2.4 Coupe à la hauteur Mingan-Anticosti-Gaspésie.....	13
Figure 2.5 Formation de la plate forme du Saint-Laurent.....	16
Figure 2.6 Diagramme de formation de la pyrite.....	17
Figure 3.1 Cas de gonflement de la pyrite.....	20
Figure 3.2 Les quatre orientations des paires soufre dans la pyrite.....	21
Figure 3.3 Enrobage des cristallites de pyrite par le gypse néoformé.....	26
Figure 3.4 Courbes de solubilité dans le système $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$	27
Figure 3.5 Bactéries du groupe <i>Thiobacillus Ferrooxidans</i>	31
Figure 3.6 Solubilité de la calcite en fonction du pH et de la température.....	33
Figure 3.7 Influence du taux de saturation sur la diffusion de l'oxygène.....	35
Figure 3.8 Remblais de garage et de sous sol dans une résidence conventionnelle.....	37
Figure 3.9 Influence de la localisation des pyrites contenues dans les granulats.....	39
Figure 4.1 Méthodologie de recherche.....	41
Figure 4.2 Méthodologie de recherche.....	42
Figure 5.1 Spectre des rayons X pour le shale A.....	51
Figure 5.2 Courbes granulométriques des concassés A et B.....	54
Figure 5.3 Courbes granulométriques des concassés C et D.....	54
Figure 5.4 Courbes granulométriques des concassés E et F.....	55
Figure 5.5 Courbes granulométriques des concassés ME et P.....	55
Figure 5.6 Courbes granulométriques du concassé B avant et après EGUS.....	56
Figure 5.7 Carottes de diamètre NX (52 x 104 mm) de l'échantillon ME.....	63
Figure 5.8 Montage pour la détermination des paramètres E et ν du calcaire ME.....	64
Figure 5.9 Carottes du calcaire ME avant et après essai de compression.....	64
Figure 5.10 Courbe contrainte-déformation pour le calcaire ME.....	66
Figure 5.11 Courbe de déformations pour le calcaire ME.....	66
Figure 5.12 Teneur en eau-masse volumique pour le calcaire ME (Proctor normal).....	70

Figure 5.13 Teneur en eau-masse volumique pour le calcaire ME (Proctor modifié).....	71
Figure 6.1 Dispositif expérimental pour la mesure de l'expansion.....	77
Figure 6.2 Moule CBR en PVC et en métal.....	78
Figure 6.3 Essais de gonflement en chambre humide.....	81
Figure 6.4 Essais de gonflement à température ambiante.....	82
Figure 7.1 Courbes témoins de l'effet bactériologique.....	84
Figure 7.2 Évolution expansive des shales P-20-CHC et P-20-TAC.....	86
Figure 7.3 Évolution expansive des shales P-5-TAC, P-20-CHC et P-20-TAC	87
Figure 7.4 Évolution expansive des concassés A, B, C, D, E, F et P.....	89
Figure 7.5 Évolution expansive du calcaire ME.....	90
Figure 7.6 Cinétique réactionnelle des shales A et P.....	94
Figure 7.7 Évolution de la vitesse spécifique de la réaction pour les shales A et P.....	95
Figure 7.8 Droite d'Arrhenius pour le shale P.....	96
Figure 7.9 Mécanisme de fissuration et de sulfatation de la dalle en béton.....	99

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1 Âges de Wisconsin, Sangamonien et Illinoien.....	14
Tableau 3.1 Analyse chimique d'eaux provenant de la carrière du mont Saint-Bruno.....	36
Tableau 5.1 Caractéristiques de génération et de neutralisation d'acide.....	47
Tableau 5.2 Évolution du pH et du potentiel de génération de sulfates.....	48
Tableau 5.3 Résultats d'analyses chimiques et minéralogiques	52
Tableau 5.4 Notions dérivées des résultats des analyses granulométriques.....	57
Tableau 5.5 Paramètres physiques des granulats.....	60
Tableau 5.6 Résultats des essais Los Angeles et micro-Deval humide.....	62
Tableau 5.7 Résultats des essais mécaniques (C_o , E_{s50} , v) du calcaire ME.....	65
Tableau 5.8 Paramètres de compactage.....	69
Tableau 5.9 Résultats de caractérisation physico-chimique et mécanique des granulats.....	73
Tableau 7.1 Conditions expérimentales appliquées aux échantillons du shale P.....	85
Tableau 7.2 Célérités expansives des shales P et A.....	93
Tableau 7.3 Synthèse des résultats obtenus.....	97

I INTRODUCTION

SOMMAIRE

Des granulats concassés pyriteux provenant de roches sédimentaires peuvent être sujets à des expansions après leur mise en place dans des remblais de fondation et, par conséquent, provoquer des soulèvements de dalles avec, dans certains cas sévères, de la sulfatation des dalles de béton. Ces cas s'appliquent à des régions qui connaissent des problèmes de gonflement où la pénurie de granulats de qualité nécessite l'utilisation des matériaux disponibles. Les gonflements observés sont imputés essentiellement à l'oxydation des sulfures, particulièrement la pyrite, la pyrrhotite et la chalcopryrite présentes dans les granulats concassés induisant après neutralisation de l'acide sulfurique formé à la formation du gypse tenu pour responsable de l'accroissement volumique. Dans les cas sévères, les solutions riches en sulfates attaquent le béton. Cette sulfatation du béton peut être significative et s'observe facilement par la délamination et la présence de sulfates dans le béton. Conséquemment, en plus du gonflement du remblai, on peut assister, dans certains cas, au "gonflement apparent" de la dalle de béton. Les pressions exercées par l'expansion du remblai, le gonflement et la dégradation du béton par sulfatation sont responsables des dommages irréversibles aux structures. À ces inconvénients s'associent les conséquences de la réhabilitation, la perte de l'évaluation foncière et du revenu locatif. Les dégâts causés par ce problème sont évalués selon des estimations récentes à environ 100 millions de dollars de dommages dans la seule région de Montréal.

Le phénomène du gonflement des remblais pyriteux devenu d'actualité est relativement complexe là où plusieurs aspects suscitent encore des questions encore obscures. C'est donc en réponse à ces prérogatives de plus en plus pressantes que cette étude a été orientée en tenant compte de l'ensemble des paramètres clés rencontrés dans le contexte des remblais de fondation.

1.1 Défis à relever

Malgré les progrès scientifiques atteints ces dernières années sur la problématique de gonflement des remblais pyriteux, certaines questions subsistent toujours. Elles se posent surtout en ce qui l'absence d'un essai normalisé permettant l'évaluation du potentiel expansif des granulats pyriteux destinés aux remblais de fondation, le seuil de tolérance en pyrite contenue dans les granulats. D'autres problèmes se posent au niveau des procédés d'intervention dans le cas de remblais problématiques déjà existants.

Bien qu'il soit théoriquement envisageable de neutraliser le phénomène d'oxydation sans avoir à enlever tout le remblai, aucun procédé remédiateur n'est disponible. Les acquis scientifiques réalisés récemment se limitent à situer le problème sur une échelle de risque qui part d'un potentiel nul à un très fort potentiel, avec entre les deux, une zone grise.

1.2 Objectifs

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un protocole de recherche initié sur la problématique des granulats pyriteux entre des universités et des laboratoires privés. L'ensemble des investigations ont été entreprises sur des échantillons prélevés dans les sites de production de granulats de divers horizons de la province du Québec.

Les principaux objectifs visés sont les suivants : établir une corrélation entre les caractéristiques physico-chimiques, mécaniques et le potentiel expansif des granulats, élaborer un essai normalisé permettant d'évaluer le potentiel de gonflement résiduel et total des matériaux granulaires pyriteux. L'objectif lointain est la validation ainsi que la normalisation du dispositif expérimental conçu à l'Université de Sherbrooke en vue de son exploitation par les laboratoires d'expertise et éventuellement par les producteurs de granulats.

2 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 Problématique associée aux remblais pyriteux

2.1.1 Historique du problème

Dans les milieux scientifiques, le problème de gonflement des roches contenant de la pyrite est connu depuis longtemps. Les phénomènes d'expansion de shale pyriteux ont été rapportés un peu partout dans le monde : aux États-Unis d'Amérique (1935), en Angleterre (1968), en Suède (1970), au Canada (1970), en Afrique du Sud (1984).

Aux États-Unis d'Amérique, la première mention du phénomène d'expansion des matériaux pyriteux causé par l'oxydation de la pyrite a été faite en 1935 par WILBUR STOUT, un géologue de l'état d'Ohio (Engineering News Record, 1960). Au début des années 50, il y a eu émergence du problème aux États-Unis, principalement dans la région de l'Ohio et de la Pennsylvanie. Les cas rapportés dans le journal Engineering News Record (1960) affirment que le gonflement serait attribué à la cristallisation du gypse et de la mélanterite, deux produits secondaires de l'oxydation de la pyrite, de la marcassite ou de la pyrrhotite contenus dans les shales. Selon ces données, les déformations structurales continuent de se manifester 25 à 40 ans après la construction, engendrant des millions de dollars de dommages dans la région industrielle métropolitaine de Pittsburgh. Dans la région de Kansas City, plusieurs déformations reliées à l'augmentation de volume accompagnant la formation de produits d'altération des sulfures ont été signalées. En 1977, d'autres études ont démontré que ce type de déformation existe aussi dans des souterrains aménagés. Afin de mieux comprendre ce mécanisme, LUTENEGER et coll.(1978) ont suivi l'expansion des shales en forçant la cristallisation de gypse artificiel par des simulations en laboratoire. À la suite de problèmes techniques, la force de cristallisation du gypse s'est limitée à 28,1 kPa, force jugée nettement insuffisante pour la déformation de structures bétonnées.

Selon MOURM et ROSENQVIST (1959), des problèmes de sulfatation du béton et de soulèvement de fondations ont touché, durant au moins 40 ans, plusieurs bâtiments érigés sur un shale dans la région d'Oslo. D'autres études faites sur un shale de la région d'Ostersund [JANGDAL, 1971] ont confirmé cette problématique et une mise en garde sur les risques que

représente la construction de structures sur des roches contenant de la pyrite a été rapportée dans plusieurs ouvrages.

En Angleterre, LEA (1968), après avoir étudié la performance de structures bétonnées en présence d'un environnement sulfaté, n'a jamais associé les fissures observées dans le béton à un gonflement extérieur à la dalle. Par contre, WILSON (1987) rapporte quant à lui le soulèvement d'une dalle construite sur un remblai de shales pyriteux dans la région de Barry (Angleterre).

En Afrique du Sud, CALDWELL et coll. (1984) attribuent les déformations structurales observées dans un complexe commercial au remblai granulaire, constitué de shale charbonneux provenant de rejets de mines. Ces auteurs affirment que la cristallisation de minéraux secondaires et l'adsorption d'eau par le matériau seraient à l'origine du gonflement.

En 1970, les mécanismes de gonflement de shales pyriteux ont été rapportés pour la première fois dans la littérature canadienne par QUIGLEY et VOGAN. Ces auteurs étudient le cas d'un mouvement différentiel vertical de 76 mm de la structure construite directement sur un roc bien drainé dans la région d'Ottawa. Selon eux, ce mouvement a été attribué au gonflement du roc sous-jacent, lui-même causé par l'oxydation de sulfures de fer disséminés dans un shale produisant des sulfates hydratés de volume supérieur. L'oxydation aurait été favorisée par la présence de bactéries autotrophes. BÉRARD (1970) et MORGENSTERN (1970) ont directement répondu à QUIGLEY et VOGAN par une discussion sur cet article dans le même numéro de publication. Évoquant la complexité du problème, BÉRARD associe le mouvement capillaire d'eau et d'oxygène au gradient thermique et clarifie son opinion sur l'action des bactéries en précisant que des minéraux instables tels que la pyrite et la pyrrhotite ne nécessitent pas obligatoirement l'action de bactéries pour l'oxydation.

Entre 1970 et 1975, d'autres publications par PENNER et coll. (1970 et 1973), QUIGLEY et coll. (1973), BÉRARD et coll. (1974) et GILLOTT et coll. (1974) confirmaient le problème de gonflement des shales pyriteux.

PENNER et coll. (1970 et 1973) publient une étude de cas pratique sur l'édifice de Bell Canada à Ottawa, où le soulèvement de la dalle est imputé à l'altération biochimique des shales argileux sous-jacents. La minéralisation du roc par des sulfures de fer le rend potentiellement réactif.

QUIGLEY et coll. (1973a) font ressortir de leurs observations l'action catalytique importante des bactéries, la nature des minéraux secondaires et leur rôle dans le gonflement des shales. Cette dernière confirmation sur le rôle catalytique des bactéries dans le processus d'oxydation de la pyrite semble être unanime chez l'ensemble des auteurs. Très récemment, TONIAZZO (1998) décrit dans son article le mécanisme d'oxydation de la pyrite par les bactéries *Thiobacillus ferrooxidans*. Après avoir nié l'oxydation directe de la pyrite par *Thiobacillus ferrooxidans*, l'auteur mentionne que les phases superficielles de la pyrite solubilisées lors de l'autoclavage représentent des apports en fer et en soufre élémentaire qui constituent des substrats énergétiques et biodisponibles pour les micro-organismes. De la même façon, les phases oxydées du fer (sulfates ferreux) et du soufre (soufre élémentaire S_8) développées sur la surface minérale par oxydation chimique constituent également des substrats assimilables. Les *Thiobacillus* sont capables d'utiliser directement ces composés organisés, voire cristallisés en surface. L'auteur conclut que les phases superficielles oxydées orientent les processus d'oxydation bactérienne à la fois par leur nature et par leur disponibilité.

BÉRARD et coll. (1975) mettent en évidence des problèmes causés à des structures en béton lorsque des traces de shale contenant 4,5 % de pyrrhotite sont présentes dans les gros granulats.

Mille neuf cent soixante-quinze est une autre année importante, car PENNER et coll. (1975) expliquaient en détail les mécanismes de réaction dans le Digest de la construction (CBD152F) du Conseil National de Recherche du Canada (CNRC). S'appuyant sur leur publication de 1970, PENNER et coll. résument la minéralogie des roches réactives, tous les minéraux secondaires présents, les réactions chimiques en cause, l'importance des facteurs biologiques et les déformations structurales généralement observées. Dans leur article, les auteurs recommandent des mesures préventives à prendre pour la pose de dalles de planchers de sous-sols sur de la roche potentiellement expansive.

En 1975, GRATTAN-BELLEW et EDEN décrivent le soulèvement d'un plancher du sous-sol d'une église d'Ottawa. Ils constatent que le béton à la base du plancher avait été attaqué par une solution de sulfate produite par l'oxydation de la pyrite, contenue dans le schiste argileux sous-jacent. Ils recommandent de protéger le béton contre l'attaque des sulfates lorsqu'il se trouve en contact avec les schistes argileux susceptibles de gonfler.

En 1982, GRATTAN-BELLEW en collaboration avec McROSTIE suggèrent une méthode préventive de construction contre tout risque de soulèvement de structures construites sur du shale.

Dans l'article paru dans le Bulletin des laboratoires des ponts et Chaussées et intitulé "*Effet de sulfates et sulfures sur des marnes traitées à la chaux et au liant routier sur un chantier autoroutier*", BARYLA et coll. (2000) mettent en évidence l'incompatibilité des composés soufrés avec un traitement aux liants classiques. Des désordres ont été observés sur le chantier de l'autoroute A28 reliant Alençon à Tours (France), où une partie de la couche de forme a présenté des boursouflures et des pertes de performance deux semaines après la mise en place, sur une longueur relativement importante. L'emploi de forts dosages en liant a rendu les marnes traitées particulièrement sensibles au risque de développement de minéraux secondaires gonflants. L'étude menée a permis de détecter le rôle nocif des ions sulfates et du soufre à l'origine de ces phénomènes. Cette incompatibilité des composés soufrés avec un traitement aux liants classiques est une mise en garde contre les procédés préventifs, surtout en ce qui concerne les travaux d'injection pour arrêter le gonflement du remblai.

BÉRUBÉ et coll. (1986) rapportent pour la première fois un cas de soulèvement au Québec. Les auteurs de l'article résument la minéralogie des roches potentiellement réactives, leur distribution dans les basses terres du Saint-Laurent et les réactions chimiques mises en cause. Le cas pratique fut celui du Collège de Sainte-Foy, pour lequel les auteurs attribuent les dommages observés aux shales pyriteux.

Les premières mentions officielles de la problématique des pierres concassées qui affecte plusieurs édifices de la région de Montréal ne datent que de 1990 et 1991, en particulier avec les travaux de CÔTÉ. S'appuyant sur les publications précédentes, CÔTÉ (1990) a mené une étude sur l'expansion des shales pyriteux dans la région de Montréal. Par des essais de laboratoire,

l'auteur a pu mettre en évidence le gonflement par cristallisation de gypse. En outre, il a pu mesurer les pressions de gonflement générées par la cristallisation du gypse. Les résultats de ses expériences sur un shale concassé pyriteux de la région de Montréal ont montré une expansion de 0,84% après 810 jours d'essai alors que les contraintes occasionnées par l'adsorption d'eau combinée à la cristallisation de gypse ont atteint un maximum de 2,56 MPa. Malgré les moyens mis en œuvre, cette valeur semble relativement élevée compte tenu de l'approche adoptée. À partir des observations et des résultats obtenus, l'auteur conclut que l'altération de shales pyriteux présents dans la région de Montréal peut provoquer un gonflement et engendrer la déformation de bâtiments. L'auteur pense, dans un premier temps, que l'adsorption d'eau par le shale entraîne la désagrégation et le gonflement de cette pierre, tandis que la cristallisation de gypse poursuit le gonflement. Jusque-là, des difficultés subsistent au niveau de l'évaluation du pourcentage de gonflement et encore moins du gonflement résiduel. Les expansions obtenues ne tiennent pas compte de l'effet bactériologique.

Le colloque organisé en 1997, à Laval (Québec), par l'*Association of Engineering Geologists* (AEG) en collaboration avec le Regroupement Professionnel des Producteurs de Granulats (RPPG), fut le premier colloque au monde portant sur le sujet. Les comptes rendus du colloque incluaient huit articles et sont encore aujourd'hui comme une référence dans le domaine. De plus, les retombées de ce colloque engendrèrent un comité technique québécois en (CTQ) composé d'universitaires, de producteurs et de professionnels de laboratoires dont les travaux établiront les normes à respecter dans ce domaine. Le comité technique a comme mandat principal de trouver des réponses aux nombreuses questions que suscitait la multiplication des cas de gonflement des remblais. À cet effet, des protocoles de recherches ont été réalisés dans les universités et certains laboratoires privés afin de mettre en place un essai de caractérisation des matériaux granulaires.

Considérant l'importance du problème, une méthodologie de caractérisation du potentiel de gonflement des matériaux granulaires sous la désignation de CTQ-M100 a été mise au point par le comité technique en avril 1999. Cette méthodologie a été adoptée pour s'assurer que la pierre qui sera désormais commercialisée par les carrières comme remblai de fondation soit provisoirement certifiée non gonflante, connue sous la dénomination "DB" pour Dalle de Béton. De plus, considérant les nombreuses expertises réalisées sur les bâtiments existants, le comité technique a

recommandé le 20 juillet 1999 un protocole d'expertise (Protocole CTQ-M200) établissant les différentes étapes pertinentes à entreprendre et à réaliser sur les résidences et les édifices affectés par la pyrite, autant sur le site qu'en laboratoire.

L'information auprès du public face à ce problème s'est beaucoup accentuée depuis 1998, date à laquelle des reportages télévisés et colloques dévoilent finalement l'ampleur du problème.

2.2 Géologie

2.2.1 Influence de la minéralogie et de la texture des roches

Les caractéristiques des granulats grossiers, telles la minéralogie, la porosité et les paramètres mécaniques, constituent l'héritage laissé par le massif rocheux d'où ils proviennent. La nature du massif est régie par l'environnement géodynamique dans lequel ce dernier s'est formé ainsi que par les divers processus de matérialisation auxquels il fut soumis. Les roches sont des assemblages de minéraux et elles présentent différentes textures et structures. Il s'agit là d'aspects importants des roches qui auront une incidence sur la qualité et le comportement des granulats [QUIRION, 1995]. On distingue trois ensembles de roches : les roches ignées, les roches sédimentaires et les roches métamorphiques, chaque catégorie étant caractérisé par son mode de formation.

Les roches magmatiques, caractérisées par une structure massive, se forment à partir du refroidissement d'un magma. Si le magma s'est refroidi lentement, les minéraux se sont largement développés et l'on a une roche à structure grenue avec des minéraux de dimension millimétrique bien visibles à l'œil nu : roche intrusive. Si le magma s'est refroidi rapidement en s'épanchant à la surface de l'écorce terrestre, la plupart des cristaux n'ont pas eu le temps de se développer et ils ne sont pas visibles à l'œil nu : roches extrusives où subsiste une phase vitreuse très finement cristallisée. Pour une composition chimique identique, on peut donc avoir, des textures très différentes. Une texture très fine conduit toujours à une forte résistance mécanique, mais les cassures sont plus lisses et ces roches sont plus polissables. Lors de la sélection des granulats, il est nécessaire de connaître la texture et la classe chimique de la roche. Par exemple, la surface de contact entre les minéraux dans une roche constitue une surface de faiblesse où peut se

développer une microfissure intergranulaire. Habituellement, cette microfissuration influence considérablement le comportement mécanique des roches, ce qui pourrait avoir une influence sur le comportement physico-mécanique des granulats.

La transformation des roches éruptives ou sédimentaires, sous l'action de la température et de la pression au fur et à mesure de leur enfoncement en profondeur, conduit aux roches métamorphiques. Les roches métamorphiques ont généralement en commun une structure foliée plus ou moins marquée. Certaines roches à grains très fins peuvent avoir des résistances remarquables : 180 à 250 MPa en compression simple. Cependant, une forte anisotropie des propriétés mécaniques rend ces roches peu utilisables dans certains domaines. Cette anisotropie est le résultat des fortes pressions qui provoquent la concentration et l'alignement des minéraux, eux-mêmes anisotropes, suivant une direction préférentielle perpendiculaire à la direction de la pression. La présence en quantité considérable de tels minéraux est indésirable, car elle peut affecter sérieusement le comportement mécanique des granulats.

Les roches sédimentaires résultent d'un dépôt à la suite de processus d'érosion et de sédimentation. Selon leur composition, ces roches sont divisées en deux catégories : les roches sédimentaires d'origine détritique (grès, sables, etc.) et les roches sédimentaires d'origine chimique (calcaires, dolomies). Notons que ces roches sont la plupart du temps formées des deux fractions, à savoir les fractions détritique et chimique, et sont classées selon la plage dominante. Les conditions dans lesquelles se forment de telles roches peuvent être variées et cela a une répercussion sur leurs caractéristiques. En raison de leur mode de formation, ces roches sont formées de couches stratifiées et sont donc anisotropes. Leur comportement mécanique diffère donc selon la direction de consolidation et en plus, elles contiennent beaucoup d'impuretés, notamment des minéraux argileux que l'on considère nuisibles dans les granulats.

En général, les types de roches potentiellement gonflantes sont de la famille des roches argileuses et contiennent toujours certains constituants tels des argiles, du quartz, des feldspaths, des phyllosilicates, du carbonate de calcium, de la matière organique et des sulfures de fer disséminés.

2.2.2 Géologie de la plate-forme du Saint-Laurent et des Appalaches

Les roches et les granulats faisant l'objet de la présente caractérisation proviennent des carrières de la région de Montréal, du Québec et de leurs environs. Ces régions se situent dans les secteurs à risques où l'on retrouve des formations de shale gris foncé à noir, de pélite argileuse gris-foncé à noire, de calcaire argileux et de dolomie argileuse [BÉRUBÉ, 1997]. Ces formations contiennent généralement de la pyrite en quantités probablement suffisantes pour constituer un risque. Elles abondent dans les basses-terres du Saint-Laurent (Ottawa, Montréal, Québec). Les formations de shale gris-foncé à noir de Nicolet (Groupe de Lorraine) et d'Utica s'étendent de Québec à Montréal en passant par Trois-Rivières. La plus grande partie de la population du Québec et les plus grands centres urbains sont concentrés le long de cet axe. On retrouve également de nombreuses formations constituées en tout ou en partie de shale gris-foncé à noir dans l'ensemble des Appalaches, soit en Gaspésie, dans le Bas-Saint-Laurent et en Estrie-Beauce [BÉRUBÉ, 1997; BLANCHETTE, 1997]. La carte à la figure 2.1 montre l'ensemble des unités géologiques du Québec.

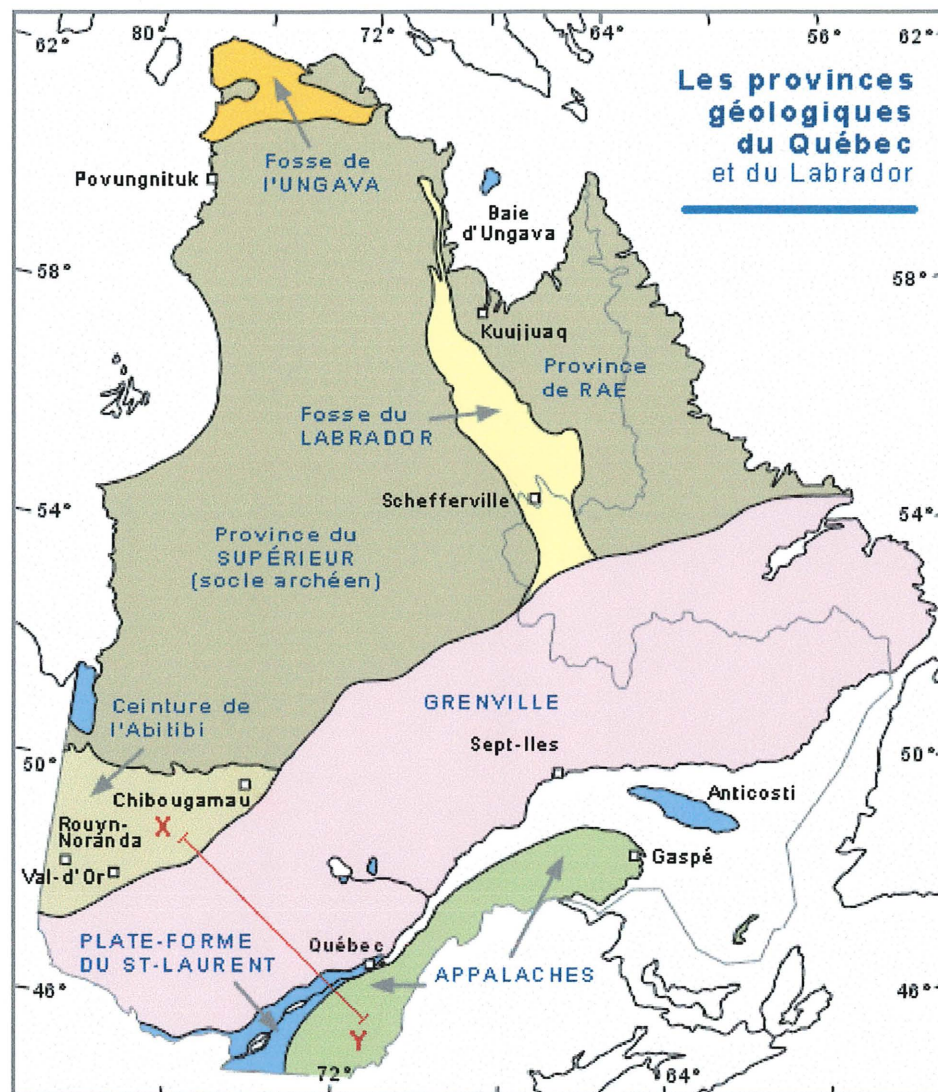


Figure 2.1 Provinces géologiques du Québec [Cours de géologie sur la Planète Terre, Université Laval]

Certains shales ont toutefois subi une certaine oxydation au cours de leur histoire géologique et ont vu leur pyrite complètement transformée en oxydes de fer. Ces shales sont souvent de couleur rouge ou brun rougeâtre et ne constituent aucune menace. Par ailleurs, les shales gris foncé et noirs contiennent presque toujours de la pyrite et sont donc susceptibles de générer des problèmes de gonflement [BERUBÉ, 1997].

La région de Montréal fait partie d'une plaine formée principalement de roches sédimentaires peu déformées de l'ère cambro-ordovicienne. Cette unité géologique est appelée « Basses Terres du Saint-Laurent » et s'étend d'Ottawa à Québec. Elle forme une aire horizontale de basse élévation occupant les deux rives du Fleuve Saint-Laurent et bordée par le socle du Grenville au nord-ouest, par la chaîne des Appalaches au sud-est et par le massif des Adirondacks au sud (voir carte géologique à la figure 2.2).

La carte (figure 2.2) et les coupes géologiques (figures 2.3 et 2.4) qui suivent présentent les relations spatio-temporelles entre ces deux provinces géologiques du sud-est du Québec, à la marge du Bouclier précambrien.

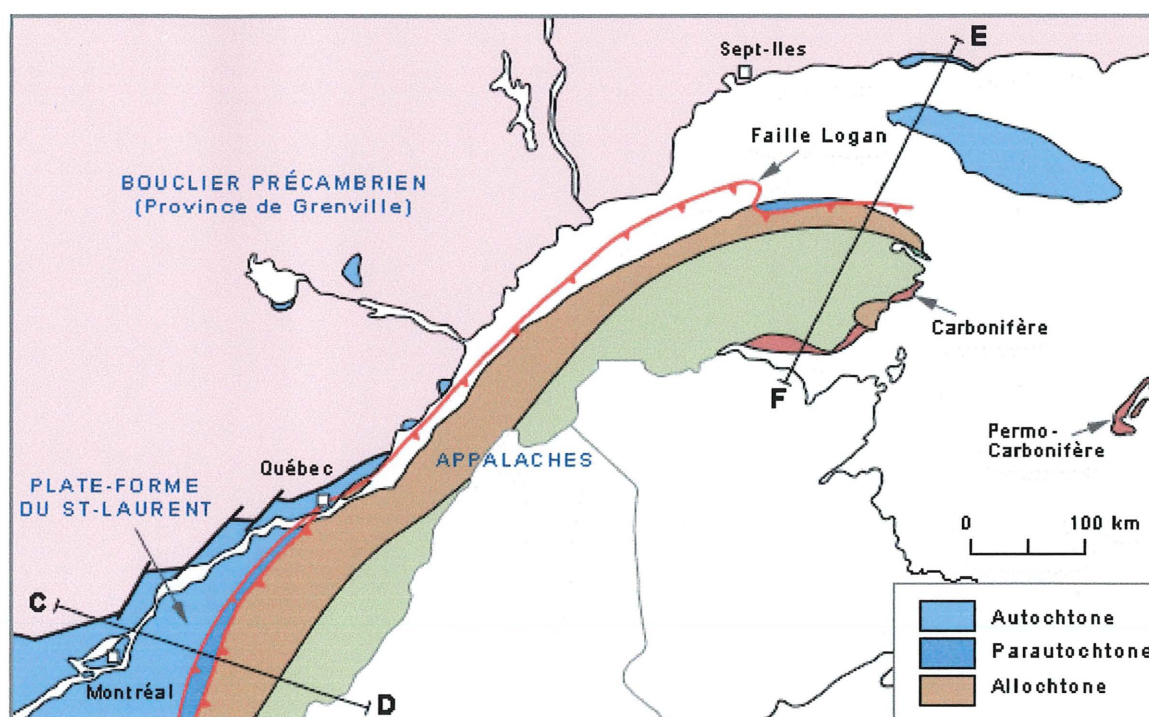


Figure 2.2 Carte géologique de la Plate-forme du Saint-Laurent- Appalaches [Cours de géologie sur la Planète Terre, Université Laval]

À la hauteur d'une coupe Montréal-Cantons de l'Est, les roches de la Plate-forme sont d'âge Cambrien et Ordovicien (coupe C-D).

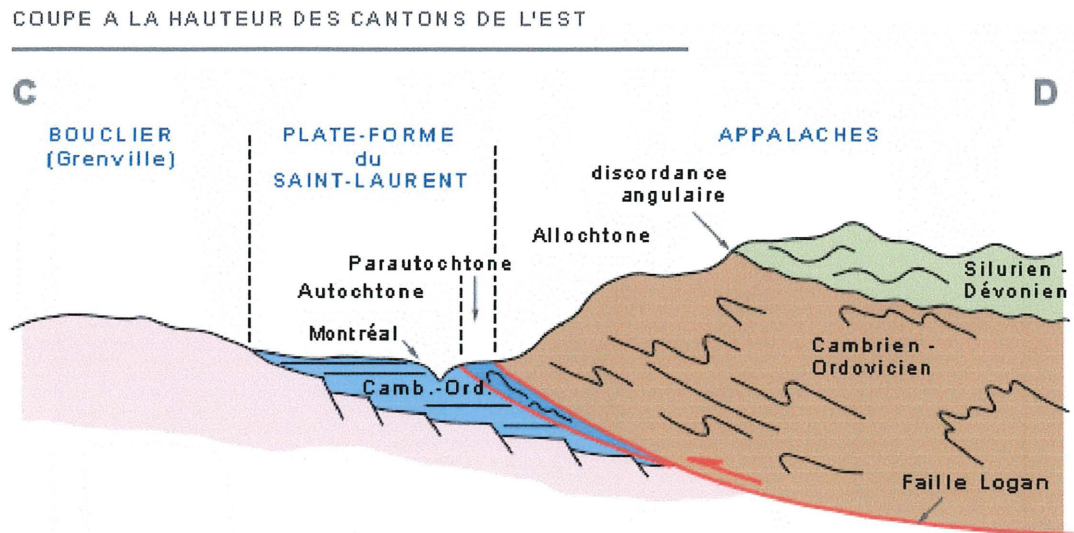


Figure 2.3 Coupe à la hauteur Montréal-Cantons de l'Est

À la hauteur d'une coupe Mingan-Anticosti-Gaspésie, elles vont de l'Ordovicien au Silurien (coupe E-F).

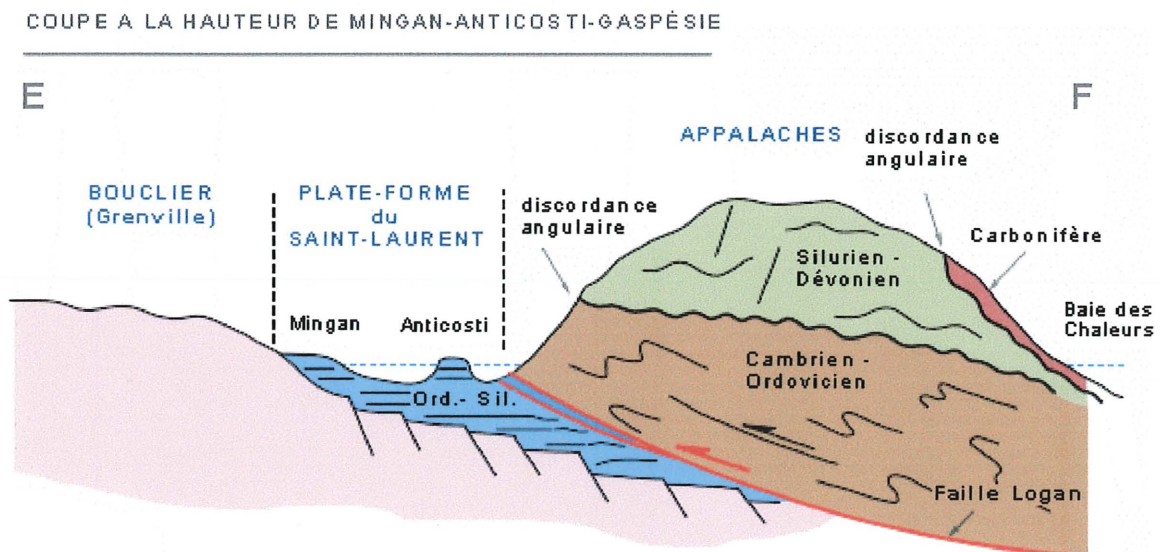


Figure 2.4 Coupe à la hauteur Mingan-Anticosti-Gaspésie [Cours de géologie, Université Laval]

La couverture de dépôts, débris ou sols qui recouvrent le socle de l'île de Montréal est originaire du dernier épisode glaciaire ou période glaciaire Wisconsin ou Pléistocène, c'est-à-dire, les derniers 125 000 ans de l'histoire de la Terre [PREST, V.K., KEYSER, J.H., 1982]. En fait, au Canada, seuls la glaciation Wisconsinienne, l'interglaciaire sangamonien et une partie de la glaciation illinoien sont connus. Le tableau 2.1 montre les âges de cette période.

TABLEAU 2.1 ÂGES DE WISCONSIEN, SANGAMONIEN ET ILLINOIEN

Périodes	Époques	Étages et âges	
QUATERNAIRE	Holocène	0	
		10 Ka	
	Pléistocène	Supérieur	
		23 Ka	
		Moyen	
		65 Ka	
		Inférieur	
TERTIAIRE	Pliocène	80 Ka	
		Sangamonien	
		130 Ka	
		Illinoien	
		?	
		1,65 Ma	

non à l'échelle

Tous les dépôts meubles observés dans l'île de Montréal sont probablement originaire de la période du Wisconsin. Le sol le plus ancien est un till de fond que l'on croit avoir été déposé par les glaciers des Laurentides et des Appalaches lors de leur avance vers le sud-ouest dans la vallée du Saint-Laurent, comme le montre la figure 2.5.

NOTE TO USERS

**Page(s) missing in number only; text follows.
Microfilmed as received.**

15

This reproduction is the best copy available.

UMI

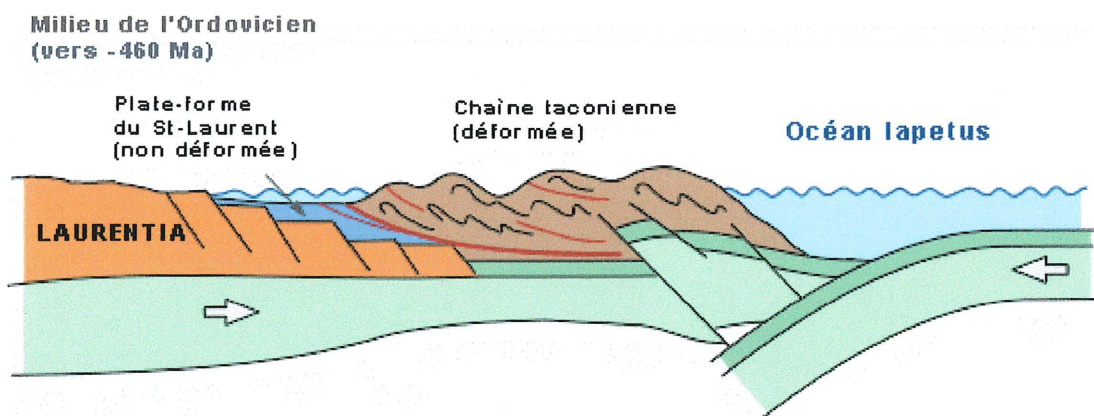


Figure 2.5 Formation de la plate forme du Saint-Laurent [Cours de géologie sur la Planète Terre, Université Laval]

Ce sol est recouvert d'un ensemble de minces couches et lentilles de till, de sédiments glacio-lacustres et de dépôts glaciaires. La mise en place de deux couches de till est due à deux épisodes de la glaciation du Wisconsin [PREST, V.K., KEYSER, J.H., 1982] appelés épisodes de Malone et de Fort Covington.

Sur l'île de Montréal, le socle rocheux est composé surtout de roches sédimentaires plus récentes. Durant une période d'affaissement de la croûte terrestre au début de l'ère paléozoïque, des sédiments sableux, argileux et limoneux furent déposés sur cette surface irrégulière jusqu'à ce qu'elle soit entièrement recouverte. Ces sédiments se transformèrent en grès, schiste, calcaire et dolomie qui recouvrent maintenant presque toute l'île de Montréal et ses environs, ainsi qu'une partie des basses terres du Saint-Laurent.

Les roches précambriennes localisées dans la région de Québec se composent surtout de granites, de gneiss métasédimentaires de type Grenville, de calcaires cristallins et de roches du Paléozoïque inférieur composées majoritairement de calcaires.

2.2.3 Formation de la pyrite

La pyrite est un minéral qu'on rencontre essentiellement dans les sédiments fins tels que les argiles ou les vases. Au cours de l'érosion, les minéraux accessoires des roches auxquelles appartient la pyrite se sont accumulés suivant divers processus dans les roches sédimentaires. La formation des pyrites dans les terrains sédimentaires nécessite une atmosphère réductrice (H_2S), un milieu anaérobie et un apport de matières organiques pour favoriser le développement des bactéries.

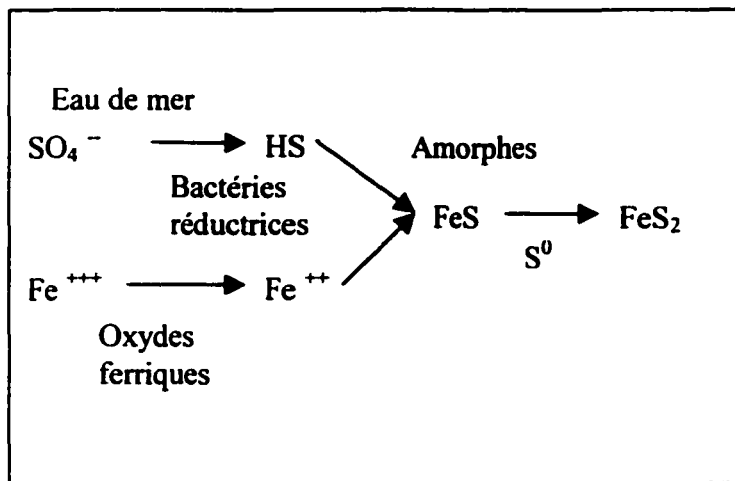


Figure 2.6 Diagramme de formation de la pyrite sédimentaire

2.2.4 Morphologie des sulfures métalliques

La pyrite (FeS_2) se rencontre essentiellement sous forme de cubes, d'octaèdres ou de dodécaèdres. Dans les granulats, les pyrites sont présentes essentiellement sous deux formes morphologiques. L'une est massive, particulièrement compacte et ne possède aucune surface interne. Les particules de pyrite sont bien cristallisées, généralement sous forme de cubes individuels dont la taille peut varier de quelques micromètres à un millimètre. L'autre est en framboïdes ou polyframboïdes constitués de cubes microniques ou encore composés d'individus

sensiblement sphériques, microniques, parfois mal cristallisés et agglomérés en sphéroïdes. Le diamètre des framboïdes peut atteindre couramment 50µm, et les grains qui les constituent, 5µm.

La marcassite (FeS_2) est un minéral très commun dans certains terrains sédimentaires (calcaires, marnes, argiles). Elle peut se rencontrer soit sous forme massive, soit sous forme fibreuse. Les caractères chimiques sont les mêmes que ceux de la pyrite de structure cubique, mais l'altération est différente et plus rapide à cause de sa structure cristallographique orthorombique thermodynamiquement instable. Dans l'air humide, la marcassite peut donner du sulfate de fer, de l'acide sulfurique et de la limonite.

La pyrrhotite (Fe_{1-x}S) se présente presque toujours sous forme massive. Elle se distingue de la pyrite par sa solubilité dans l'acide chlorhydrique. La pyrrhotite s'altère également par oxydation en limonite, sidérose et en divers sulfates.

3 MÉCANISMES DE RÉACTION ET DE GONFLEMENT

Ce chapitre décrit les réactions chimiques et biologiques, les facteurs qui influencent l'oxydation de la pyrite, l'expansion du remblai et la sulfatation du béton. La connaissance de ces mécanismes réactionnels fondamentaux qui régissent les réactions dans le remblai et dans le béton permettra de cerner l'expérimentation envisagée en tenant compte des paramètres clés réellement rencontrés.

3.1 Déformation structurale des bâtiments due à la problématique de la pyrite

De très nombreux cas de soulèvement de dalles répertoriés en particulier dans les basses du Saint-Laurent (Ottawa, Montréal, Québec) sont attribués à l'oxydation des sulfures présents dans les granulats ou dans le roc [BERUBÉ, 1986; PENNER, 1973; QUIGLEY, 1970; COTÉ, 1997]. Ce comportement provoque aussi des désordres sulfatiques dans le béton des dalles [BERARD, 1997; DIVET, 1996]. Le gonflement du matériau de remblai est parfois accompagné par un phénomène de sulfatation du béton de la dalle. La réaction de sulfatation se produit entre le gypse de néoformation et les aluminates du ciment, formant ainsi des minéraux secondaires comme l'ettringite. Les granulats du béton sont alors brisés en disques parallèles avec la surface de la dalle [BÉRARD, 1997], au fur et à mesure que monte le front d'attaque chimique.

La figure suivante illustre différents cas relevés où il apparaît des phénomènes de gonflement, de sulfatation et de gonflement associé à la sulfatation dans la région de Montréal.



A : Gonflement de la dalle dans un garage



B : Gonflement dû au roc dans une école



C : Fissure dans un mur extérieur



D : Gonflement et sulfatation de la dalle



E : Gonflement et sulfatation de la dalle du garage



F : Sulfatation complète de la dalle (sous sol)

Figure 3. 1 Cas de gonflement dus à la pyrite

3.2 Réactivité des sulfures métalliques contenus dans les granulats

Le contact des sulfures métalliques avec l'humidité et l'oxygène peut entraîner une oxydation de ces sulfures, particulièrement la pyrite et une variété allotropique de celle-ci désignée forme framboïdale [BÉRARD, 1970; CÔTÉ, 1991; BÉRUBÉ, 1997; TANGUAY, 1998]. Cette particularité résulte de la présence dans la structure cristalllographique de la pyrite (FeS_2) de paires soufre S_2^{2-} ; espèces plus labiles, donc, plus réactives que les soufres S^{2-} (figure 3.2). Une autre variété de sulfure de fer (marcassite) avec des paires soufre peut contribuer de façon non négligeable au phénomène d'expansion. Cette espèce thermodynamiquement métastable se prête plus facilement à l'oxydation que la pyrite.

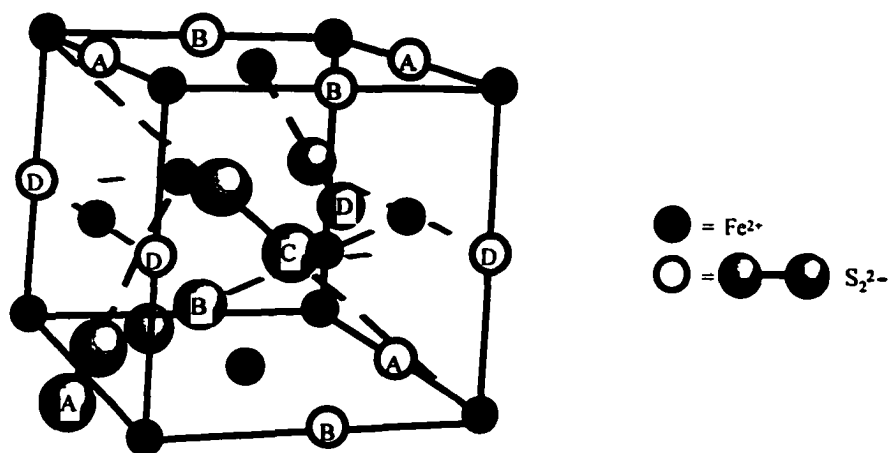


Figure 3.2 Les quatre orientations (A,B,C,D) des paires soufre dans la pyrite [MESSRSCHKE, 1973]

La pyrrhotite avec une stœchiométrie proche de Fe_{1-x}S se manifeste avec une réactivité importante. Cette réactivité est attribuée à la présence de lacunes anioniques reconnues comme un facteur essentiel dans la réaction d'oxydation.

Dans le cas des sulfures mixtes ou des solutions solides tels que la chalcopryrite (CuFeS_2), les grandes réactivités générées par ces systèmes sont dues à une synergie développée par un effet promoteur assuré généralement par de faibles teneurs en métaux de transition.

Les réactions conduisant au gonflement du remblai, au soulèvement et à la fissuration de la dalle de béton s'effectuent en trois étapes :

- Oxydation de la pyrite et formation d'acide sulfurique;
- Réaction entre l'acide sulfurique et les carbonates présents;
- gonflement du remblai et sulfatation du béton de la dalle.

3.2.1 Oxydation des sulfures et formation de l'acide sulfurique

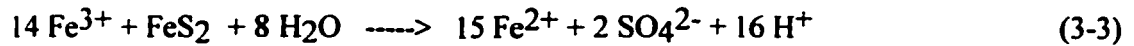
En présence d'oxygène et d'humidité, l'oxydation directe de la pyrite peut être représentée par l'équation stoechiométrique suivante [NORDSTROM, 1982; NICHOLSON et coll., 1989] :



La dissolution de Fe^{2+} , SO_4^{2-} , et H^+ représente une augmentation des solides dissous et de l'acidité de l'eau. Lorsque le pH du milieu est bas (de 1,5 à 3,5) et que l'oxygène est disponible, il se produit une oxydation du fer ferreux, Fe^{2+} , en fer ferrique, Fe^{3+} , selon la réaction suivante :

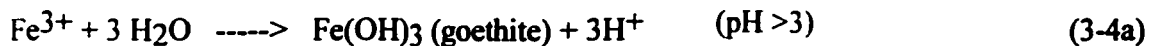


L'oxydation du fer ferreux en fer ferrique est catalysée notamment par des bactéries ferroxidantes, essentiellement les *Thiobacillus Ferrooxidans* [TONIAZZO, 1998]. Le fer ferrique, présent originalement dans la solution ou formé par la réaction (3-2), peut oxyder davantage la pyrite, générant ainsi une addition de fer ferreux dissout et d'acidité, selon l'équation suivante :

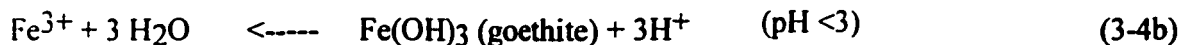


Ainsi, une fois commencé, le processus de génération d'acide se perpétue tant qu'il y a des sulfures de fer, de l'eau et de l'oxygène et est très fortement accéléré par la présence de bactéries. Le processus global de l'oxydation de la pyrite peut donc être représenté par la combinaison des équations (3-2) et (3-3) et on notera que, quel que soit le mécanisme, 2 moles d'acides (ions H^+) sont produites pour chaque mole de pyrite consommée [ALPERS, 1991].

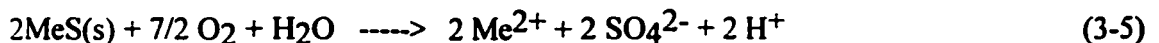
À des valeurs de pH supérieures à 3, il se produit une hydrolyse du Fe^{3+} , entraînant une précipitation d'hydroxydes ferriques générant davantage d'acidité, selon l'équation :



Si le pH redescend en dessous de 3, le cheminement de la réaction est inversé, multipliant ainsi les ions Fe^{3+} susceptibles d'oxyder la pyrite en présence de bactéries, ce qui éternise la réaction d'oxydation [BERUBÉ, 1997].

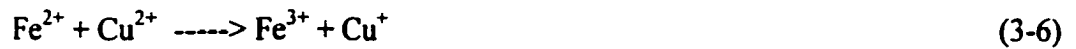


Les réactions d'oxydation des sulfures de métaux (MeS) autres que le fer s'effectuent de façon similaire à celle décrite par l'équation (3-1), soit :



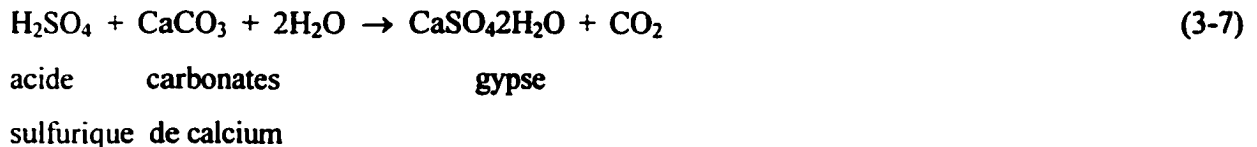
où Me représente n'importe quel ion métallique tel Pb, Zn, Ni, etc. Ces ions métalliques sont également libérés sous forme ionique par la dissolution des minéraux métalliques par les solutions acides.

Plusieurs ions métalliques spécifiquement les métaux de transition (exemples Cu^{2+} , Mg^{2+} et Mn^{2+}) peuvent catalyser la réaction d'oxydation de la pyrite.



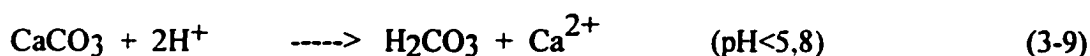
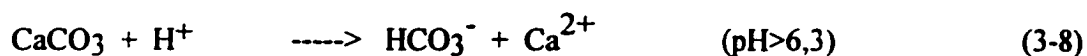
3.2.2 Réactions entre l'acide sulfurique formé et les carbonates présents

L'interaction chimique de la calcite et/ou de la dolomite avec l'acide sulfurique issu des réactions d'oxydation entraîne l'apparition du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et/ou de l'epsomite ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) comme produits de neutralisation [JAMBOR, J.L., 1991].



L'expansion générée par la formation du gypse est expliquée par la différence de la masse volumique entre la pyrite ($5,02 \text{ g/cm}^3$), la pyrite framboïdale ($4,12 \text{ g/cm}^3$) et le gypse ($2,36 \text{ g/cm}^3$), les variations de volume étant inversement proportionnelles aux variations de densité [BALLIVY et coll., 1999]. L'expansion ettringitique serait d'un facteur oscillant autour de 5.

Le cas des remblais de fondation peut être illustré par la problématique du drainage minier acide se produisant dans les parcs à résidus. En effet, des réactions tampons telles que la dissolution des carbonates et des silicoaluminates ont parfois lieu et ont comme effet de diminuer l'acidité du drainage et de tamponner le système dans le cas des carbonates. La dissolution des carbonates, entre autres, conduit à la réduction de l'acidité par la consommation des ions H^+ . Un minéral comme la calcite (CaCO_3), en particulier, va réagir rapidement, consommer des ions H^+ et libérer en solution des ions Ca^{2+} et HCO_3^- :



3.2.3 Gonflement du remblai et sulfatation de la dalle

La formation d'hydroxydes de fer et de sulfates de calcium et de fer entraîne une augmentation de volume de plus de 100 % par rapport aux minéraux originaux (calcite, pyrite). De plus, ces minéraux se déposent dans les fissures préexistantes des granulats, fissures qu'elles tendent à ouvrir davantage. La cristallisation du gypse néoformé crée une poussée suffisante pour soulever la dalle de béton. Le soulèvement de la dalle de béton provoque finalement sa fissuration. Dans certains cas, plus sévères et plus rares, une pression latérale se crée, entraînant une fissuration des murs de fondation pouvant se propager vers les parties supérieures, comme l'illustre la plaque photographique montrée à la figure 3.1. En plus du gonflement dans le remblai, il faut ajouter le gonflement additionnel dû à la sulfatation du béton. En effet, les solutions riches en sulfates attaquent le béton en réagissant avec les aluminates de ciment. Cette sulfatation du béton peut être significative et s'observe facilement par la délamination et la présence de sulfates à la base du béton. Il est évident que ce comportement dépend étroitement de la nature du ciment à savoir présence ou absence d'aluminates et aussi de la porosité du système. D'après plusieurs auteurs, l'attaque du béton par les sulfates provenant de l'oxydation de granulats sulfurés engendrerait la cristallisation d'ettringite secondaire selon l'équation suivante :



Soumis aux conditions climatiques, le gypse néoformé peut enrober les sulfures contenus dans les granulats et entraîner, par conséquent, l'apparition d'une couche protectrice pouvant atténuer la diffusion de l'oxygène vers les sulfures (figure 3.3). Cependant, cette couche peut s'avérer vulnérable à cause de la solubilité du gypse dans l'eau (figure 3.4) (environ 2g/l) et aussi par l'apparition de fissures, qui après dessiccation permettant la continuité des réactions d'oxydation à la suite de l'infiltration de l'humidité et de l'oxygène.

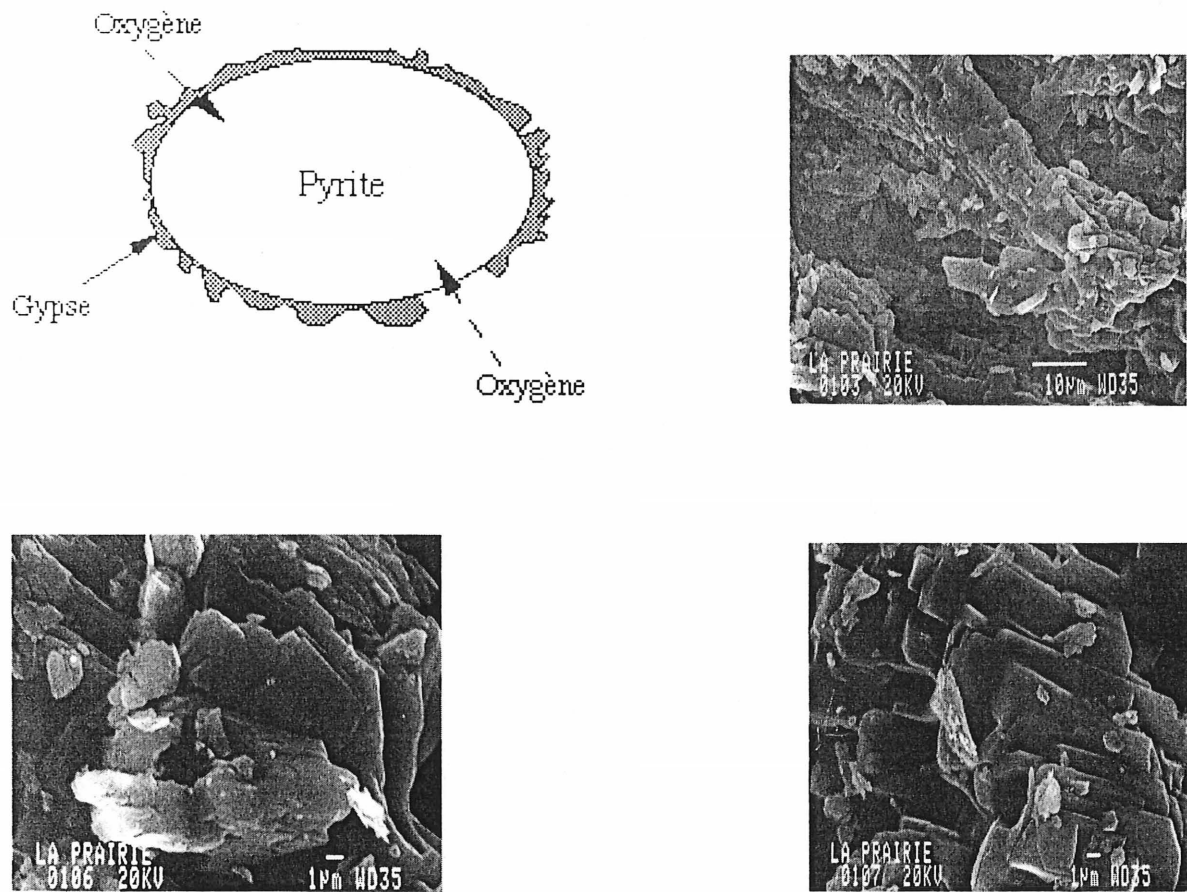


Figure 3.3 Enrobage des cristallites de pyrite par le gypse néoformé

[BALLIVY et coll.,1997]

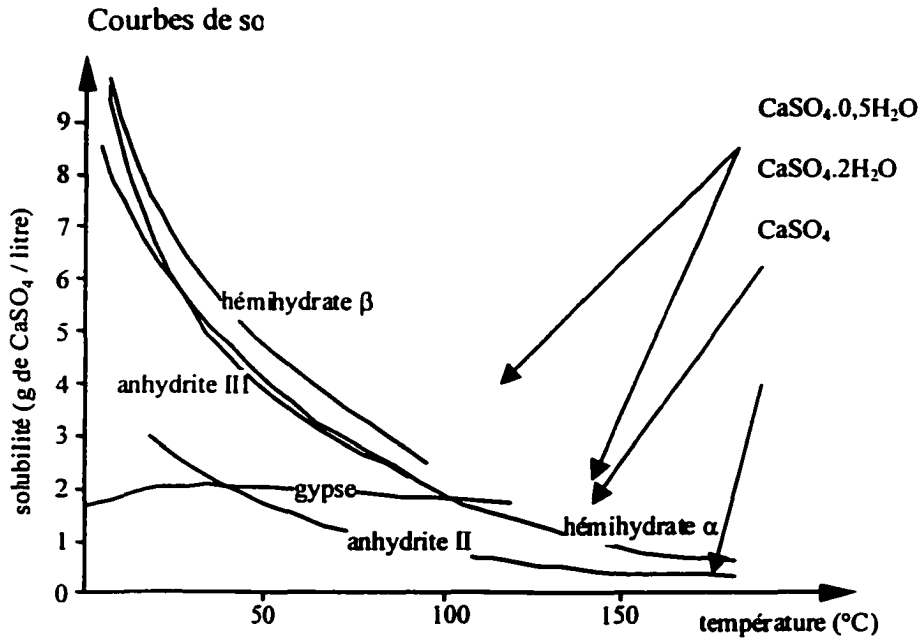


Figure 3.4 Courbes de solubilité dans le système $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ [ROCHE et coll., 1990]

En effet, de nombreux auteurs [GRATTAN-BELLEW et coll. 1982; BÉRARD et coll., 1975] ont caractérisé par microscope la présence dominante de dépôts jaunâtres de jarosite [$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$] qui est, selon eux, un produit typique de l'altération des pyrites et reconnu expansif.

À des pH inférieurs à 6,5 et un potentiel redox (POR) supérieur à 500 mV et en présence de potassium, de groupements sulfates et d'ions ferriques, la jarosite se forme selon la réaction suivante:



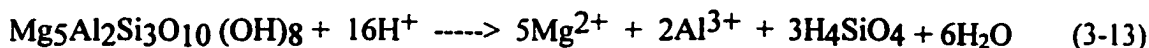
Ce sulfate de fer mixte appartient à la famille des minéraux de la formule générale $\text{AB}_3(\text{XO}_4)_2(\text{OH})_6$ où A représente un cation de valence 1 ou 2 (Na^+ , K^+ , H_3O^+ , Ca^{++} , Pb^{++} ...), les cations Al^{3+} ou Fe^{3+} sont représentés par B et XO_4 peut être SO_4^{2-} [DIVET, 1996].

Selon les données de la littérature, l'expansion générée par la formation de la jarosite serait d'environ 115 % [PENNER, 1973]. Il faut ajouter l'accroissement de volume de 170% dû à la transformation de la pyrite (équation 3-1) en sulfate ferrique (équation 3-3). Il est probable que, du fait que la jarosite et le gypse sont des produits finaux, ce sont les minéraux auxquels on peut sûrement imputer les accroissements de volume [SWENSON, 1974] et qui sans doute contribuent en plus grande partie aux accroissements de volume synonyme de soulèvement.

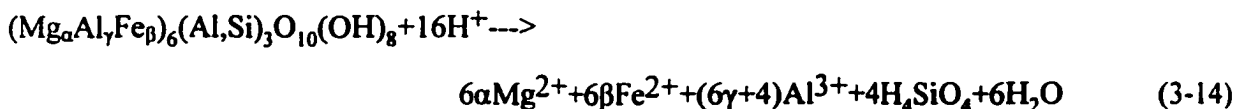
En général, les produits les plus fréquemment rencontrés lors de l'oxydation des pyrites sont la rouille sous toutes ses formes [goethite (FeOOH), limonite (2Fe₂O₃.3H₂O), etc.], le gypse, l'ettringite et la jarosite.

3.2.4 Contribution des silico-aluminates au potentiel expansif

Les silico-aluminates ou fractions argileuses peuvent aussi contribuer aussi de façon non négligeable au potentiel expansif des criblures. À des pH acides, il se produit une réaction entre les protons H⁺ et la structure cristallographique des argiles. Cette interaction chimique peut être représentée par la réaction de la chlorite :



ou sous forme générale :



Cette interaction conduit généralement à une désalumination des sites octaédriques des silico-aluminates avec apparition de systèmes lacunaires à base de silicium. Il est établi que les structures argileuses à caractère gonflant peuvent contribuer aussi au caractère expansif des remblais et du roc de fondation. En fait, les minéraux argileux se transforment progressivement en minéraux argileux

gonflants du type smectite durant l'attaque acide [BÉRUBÉ, 1997], ce qui aurait pour effet d'exposer encore plus de pyrite à l'oxydation

Il est évident que les cations libérés dans l'eau interstitielle par cette interaction chimique sont susceptibles de s'intercaler entre les feuillets des structures lamellaires. Lorsque les conditions en terme de pH et de molarité sont favorables, il peut se produire une hydrolyse de ces cations pour former des oligomères d'hydroxyde sous l'action de la dissolution de sources alcalines telles que la calcite et/ou la dolomite. Les polycations ainsi formés peuvent s'intercaler dans l'espace interlamellaire et engendrer, par conséquent, une augmentation du paramètre de maille c de la structure hexagonale. Cette intercalation est, dans certaines conditions, irréversible et elle permet la formation d'argile à piliers. La matrice argileuse étant le site d'accueil, les oligomères d'hydroxyde constituent les piliers. En général, ce gain dans l'espace interlamellaire est proportionnel aux dimensions des polycations accueillis.

Les sols sujets au gonflement constituent au Canada comme au Burundi, le risque naturel le plus coûteux pour les bâtiments construits sur des fondations peu profondes. Dans les seules provinces des Prairies, un million de Canadiens ou plus vivent dans des agglomérations construites sur des sols ayant un potentiel d'expansion très élevé [HAMILTON, 1977]. D'autres cas ont été rapportés dans les régions de Québec, d'Ottawa et de la Rive-sud de Montréal (ACQC¹).

Au Burundi, la majorité des dommages subits par les bâtiments est due au mouvement gonflement-retrait du roc de fondations et plus précisément d'un roc constitué par de l'argile de structure lamellaire. Quelques cas de déformations structurales des bâtiments dues au gonflement du roc argileux sont montrés en annexe A. Il s'agit de l'endommagement structural des bâtiments abritant le Centre Hospitalo-Universitaire de Kamenge (Burundi), où le roc de fondation est mis en cause.

¹ Association des consommateurs pour la qualité dans la construction, Montréal

3.3 Facteurs influençant l'oxydation et l'expansion

Étant contenue dans les granulats, la pyrite, pour être apte à l'oxydation, doit être en surface des solides pour pouvoir présenter une surface de contact avec l'humidité et l'oxygène. Cette présence se manifeste soit en surface du granulat, soit en surface dans les fissures des granulats. Les sulfures localisés à l'intérieur des solides sont très peu affectés par les réactions d'oxydation.

La réaction d'oxydation de la pyrite est gouvernée principalement par certains facteurs spécifiques [BÉRUBÉ et coll., 1986; BÉRARD, 1970; CÔTÉ, 1991; BÉRUBÉ, 1997; TANGUAY, 1998] : pH; température; teneur en oxygène; degré de saturation en eau; surface spécifique des sulfures; nature et population bactérienne.

3.3.1 Influence de la population bactérienne

Selon les études menées par PUGH et coll. (1984) et TONIAZZO (1998), la présence des bactéries de type *Thiobacillus Ferrooxidans* favorise de manière significative l'oxydation des pyrites. En effet, pour un même traitement, la vitesse de réaction est neuf fois plus élevée en présence de *Thiobacillus Ferrooxidans*.

Les bactéries de l'espèce *Thiobacillus* sont les plus importantes au niveau de l'oxydation du soufre dans le sol. De façon générale, c'est l'oxygène gazeux qui intervient lors de l'oxydation effectuée par les bactéries aérobies, mais plusieurs espèces de *Thiobacillus* peuvent utiliser l'oxygène des nitrates en conditions peu oxygénées.

Outre les autotrophes, les autres bactéries pouvant oxyder les composés inorganiques du soufre sont les bactéries hétérotrophes. Ces dernières utilisent les composés organiques comme sources de carbone et d'énergie, et peuvent oxyder les composés inorganiques du soufre comme les thiosulfates, le soufre élémentaire et les sulfites.

Les bactéries de type *Thiobacillus Thioparus* sont responsables de l'oxydation du soufre élémentaire et des composés à valence réduite tels que FeS_2 , ZnS , PbS , NiS , CuS , CoS ou des composés mixtes comme Cu_5AsS_4 , FeAsS , CoAsS .

La mise en solution des métaux en milieu acide est due à la capacité métabolique de la *Thiobacillus Ferrooxidans* de prendre son énergie de l'oxydation du fer ferreux en fer ferrique ainsi que de l'oxydation du soufre élémentaire et des sulfures. Par contre, la bactérie *Thioparus* possède la propriété d'oxyder le soufre élémentaire à pH neutre ou acide. La prolifération de ces micro-organismes est favorisée par un milieu propice défini par le maintien d'un pH acide, la disponibilité d'oxygène et d'humidité ainsi que par des températures oscillant entre 20 et 35°C [PENNER et coll., 1975], facteurs pour lesquels l'oxydation est maximale. Le micrographe suivant illustre de façon significative la taille et la morphologie des bactéries du type *Thiobacillus Ferrooxidans*.

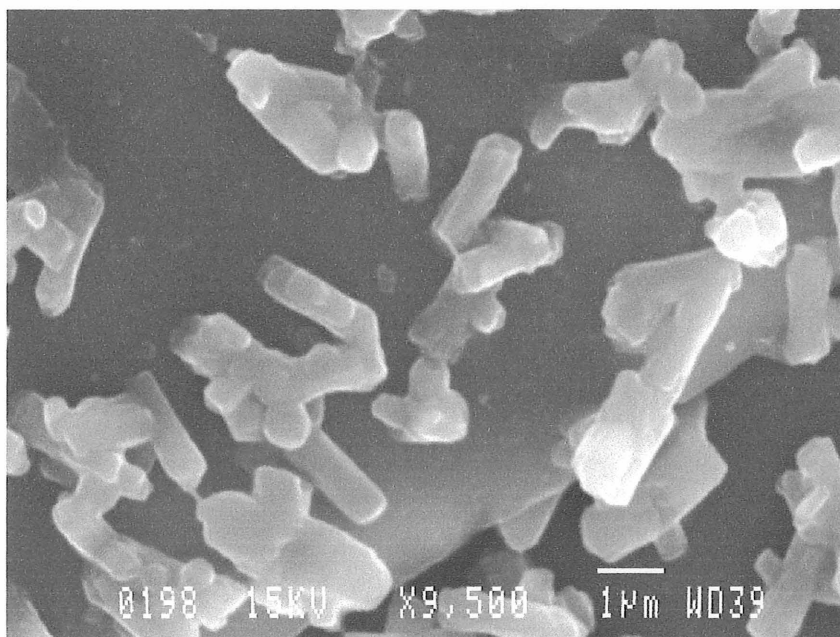


Figure 3.5 Bactéries du groupe *Thiobacillus-Ferrooxidans* [KADIRI, 2000]

L'activité bactérienne ne semble pas présenter, à priori, une influence sur les réactions d'oxydation, du fait que les granulats constitués majoritairement de calcite (CaCO_3) et de dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) peuvent générer un milieu faiblement alcalin défavorable au développement bactérien et à l'activité catalytique. Néanmoins, dans un cas de soulèvement de dalle causé par le roc dans un édifice à Ottawa [QUIGLEY, 1970], une population bactérienne non négligeable a été mise en évidence. Les bactéries autotrophes tirent leur énergie d'oxydation de composés inorganiques, et ce processus a lieu avec consommation d'oxygène de l'air. Les constituants protéinés formés à partir du CO_2 atmosphérique et des produits de base tels que l'azote sont toujours présents dans les argiles litées pyriteuses pour permettre la croissance et la reproduction des bactéries.

3.3.2 Influence du pH

L'influence du pH sur la vitesse de solubilisation de la pyrite a fait l'objet de peu d'expérimentation. En 1982, LOWSON a montré que la cinétique d'oxydation dans l'eau à 20°C et à une pression partielle en oxygène de 1 atm suit une fonction exponentielle dans la gamme de pH de 10 à 1. La plupart des études ont été effectuées en solution acide ($\text{pH} < 4$).

En ce qui concerne l'influence du pH sur le taux d'oxydation, l'activité bactérienne, essentiellement celle des *Thiobacillus Ferrooxidans*, est maximale pour des valeurs de pH comprises entre 1,5 et 5. D'autres travaux [MALOUF, 1961; LANDESMAN, 1966] ont montré que cette activité est optimale pour des pH oscillant entre 2,5 et 4,0.

SMITH (1970) préconise que le taux d'oxydation chimique de la pyrite à 25°C croît de façon linéaire avec le pH pour des valeurs allant de 2 à 10. Par contre, l'influence du pH sur le taux d'oxydation biologique laisse apparaître un maximum situé entre 3 et 3,5.

Comme il apparaît à la figure 3.6, la solubilité de la calcite s'accroît avec la diminution du pH pour atteindre des valeurs oscillant autour d'un pH tampon caractéristique des carbonates.

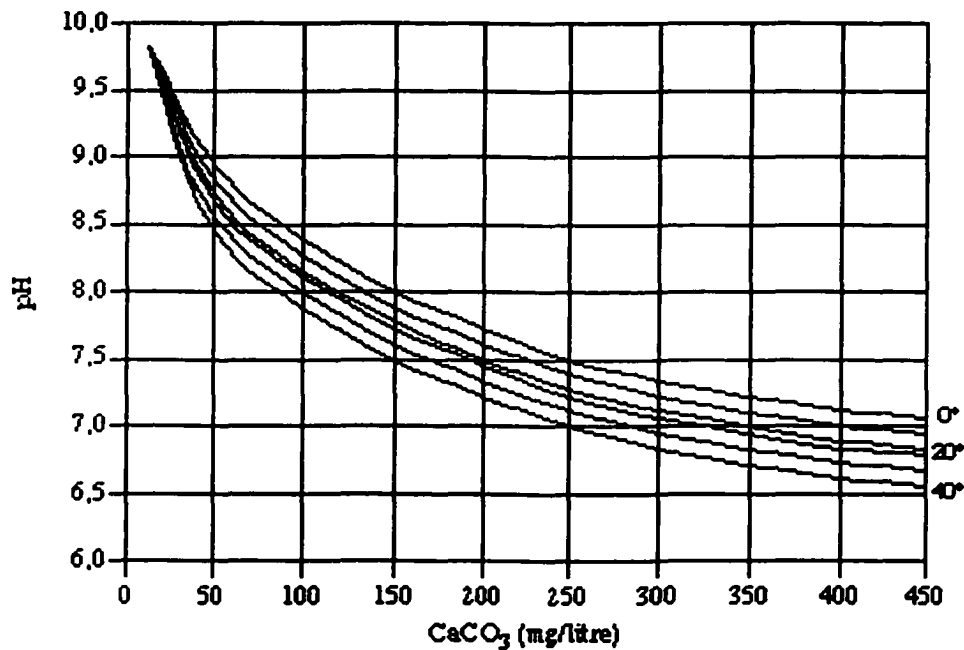


Figure 3.6 Solubilité de la calcite en fonction du PH et de la température [JACQUIER et coll., 1969]

3.3.3 Influence de la température

Comme la plupart des réactions chimiques, une plus grande température a pour effet d'accélérer l'oxydation de la pyrite. La température optimale de développement des bactéries autotrophes se situe entre 30 et 35°C [PENNER et coll., 1970]. Les sous-sols chauds, comme ceux contenant des locaux techniques, élèvent la température des matériaux sous-jacents, ce qui favorise la multiplication et la prolifération des bactéries, donc accroît les vitesses d'oxydation et de soulèvement.

Outre son influence sur la dilatation thermique, l'augmentation de la température entraîne selon Arrhenius un accroissement de la vitesse de réaction d'environ 2 à 3 fois à chaque 10°C [MORTH et SMITH, 1966].

Le gradient thermique créé entre le remblai et la dalle de béton chauffée permet la migration d'oxygène et d'humidité du bas vers le haut, favorisant ainsi l'oxydation de la pyrite.

3.3.4 Influence du taux d'oxygénation et du degré de saturation en eau

Dans un remblai, le transport d'oxygène se réalise soit par diffusion ou par advection. Le coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'air est de $1,78 \cdot 10^{-5} \text{m}^2.\text{s}^{-1}$ contre $2,2 \cdot 10^{-9} \text{m}^2.\text{s}^{-1}$ en phase liquide. Donc, l'infiltration de l'oxygène dans les sols ou remblais se fait principalement par diffusion dans l'air [NICHOLSON, 1989].

Le taux de saturation en eau est le facteur principal contrôlant la diffusion d'oxygène [CABRAL et coll., 2000]. Comme le montre la figure 3.7, une réduction maximale du coefficient de diffusion de l'oxygène est atteinte à des hautes saturations [NIELSON et coll., 1984]. Il est à signaler que dans les conditions standard, la solubilité de l'oxygène dans l'eau est de $8.5 \cdot 10^{-3} \text{ g/l}$ et que celle-ci décroît avec l'augmentation de la température [NARITA, 1981].

En somme, le contrôle et la limitation du drainage dans les remblais potentiellement expansifs peuvent s'avérer un moyen préventif contre l'oxydation. Cependant, leur mise en œuvre dans un remblai de fondation peut se révéler difficilement réalisable voire impossible et peut même affecter les propriétés mécaniques, surtout celles des concassés argileux.

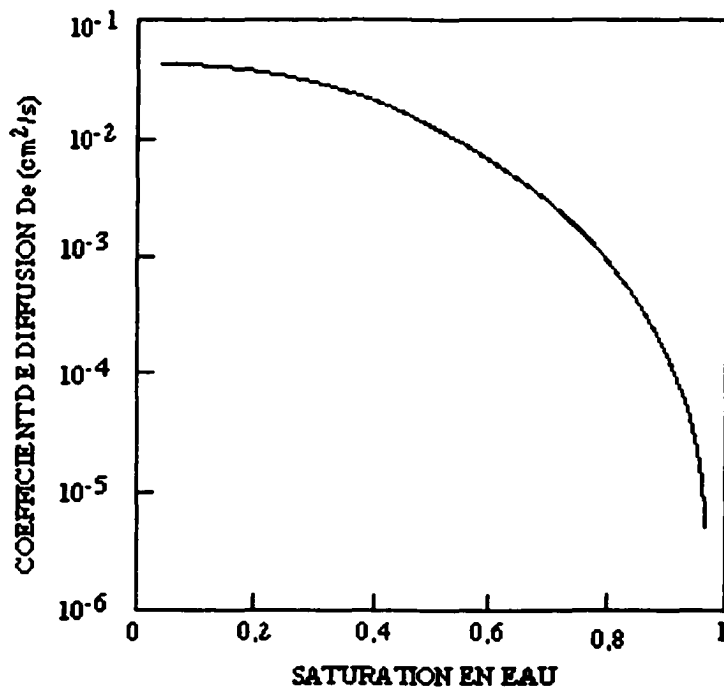


Figure 3.7 Influence du taux de saturation sur le coefficient de diffusion d'oxygène [YANFUL et ARNAUD, 1990]

La nappe influence beaucoup les paramètres de l'oxydation de la pyrite : le pH, l'humidité, les ions sulfates et leur transport. Elle est alimentée par deux principales sources : les eaux souterraines et les eaux de pluies. La quasi-totalité des eaux souterraines proviennent de précipitations. Or, certaines pluies acides contiennent une quantité non négligeable d'ions SO_x [DELISLE et coll., 1986] et peuvent entraîner la formation du gypse lors de l'entreposage des granulats dans les carrières. De par son caractère alcalin, la calcite présente une solubilité supérieure à 450 mg de CaCO_3 par litre (25 C) pour des pH inférieurs à 7. Les ions Ca^{++} libérés à la suite de cette dissolution peuvent se combiner avec les groupements sulfates issus des pluies acides pour former le gypse.

En plus de la teneur en groupements sulfatiques initiale, ces eaux parcourent une longue distance, traversant différentes lithologies allant des zones de recharge aux zones de décharge, se chargeant en ions solubles par une série de processus géochimiques.

Les concentrations surélevées en sulfates (SO_4) sont une particularité des shales potentiellement gonflants. Le tableau suivant met en évidence les concentrations des différents éléments majeurs et de l'acidité (pH) des eaux contenues dans les shales de la région de Montréal [CÔTÉ, 1990].

TABLEAU 3.1 ANALYSES CHIMIQUES D'EAUX PROVENANT D'UNE CARRIÈRE DU MONT SAINT-BRUNO (SOURCE : CÔTÉ, 1990) (ppm)

Éléments	Éch.#1 Lac	Éch.#2 Lac	Éch.#3 Parois	Éch.#4 Parois
Fe	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005
Ca	46.200	46.300	50.800	53.100
Mg	24.900	25.700	20.600	21.400
Na	109.00	118.000	62.600	39.500
K	4.710	5.050	4.030	4.020
SO_4	293.000	310.000	210.000	156.000
pH	8.07	8.12	8.00	7.88

Afin d'éviter les problèmes causés par la variation du niveau de la nappe phréatique, un bon drainage souterrain autour d'un édifice est nécessaire pour prévenir la détérioration des matériaux de construction par l'humidité. Le drainage souterrain autour des murs de soutènement (figure 3.8) élimine les problèmes d'inondation et d'humidité dans les sous-sols .

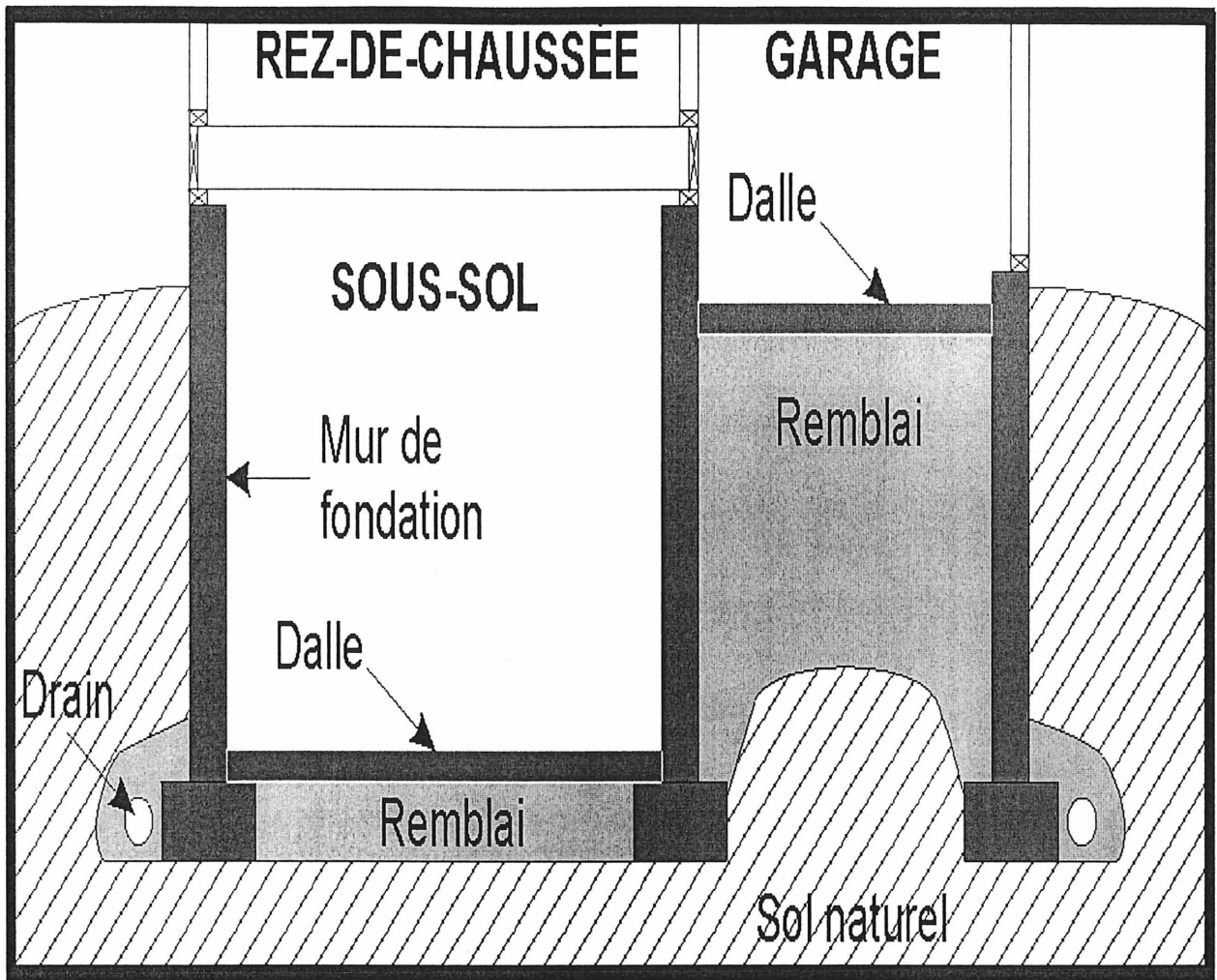


Figure 3.8 Remblais de garage et de sous sol dans une résidence conventionnelle

3.3.5 Influence de la morphologie et de la surface spécifique des sulfures

Dans la littérature et à cause du caractère isotrope, on a souvent admis que la vitesse d'oxydation des pyrites était reliée linéairement à la surface de l'échantillon. Ceci ne fait pas l'unanimité chez les scientifiques. Néanmoins, de nombreux auteurs [NICHOLSON et coll., 1989] ont établi une relation présentant une bonne linéarité avec l'aire estimée par $1/d$, où d correspond à la taille moyenne des grains de pyrite. Selon cette théorie, la pyrite framboïdale est beaucoup plus réactive que la pyrite massive.

3.3.6 Influence de la localisation des pyrites contenues dans les granulats

Le critère de porosité apparaît fondamental dans la prévision de l'altérabilité des granulats [QUIRION, 1995], notamment la porosité ouverte ou dite communicante. Malgré leur compacité, les granulats calcaires peuvent être parfois perméables à cause des nombreuses fissures présentes et que les processus hydriques ont pu élargir par dissolution. Le mode d'exploitation des granulats provoque aussi des microfissures nuisibles à leur résistance mécanique et, par conséquent, à leur résistance chimique.

Des chercheurs belges du Centre National de Recherche Scientifique et Technique pour l'Industrie Cimentière ont proposé une classification des pyrites en fonction de leur localisation dans les granulats calcaires (figure 3.9):

- pyrites internes;
- pyrites en bordure;
- pyrites de fissure.

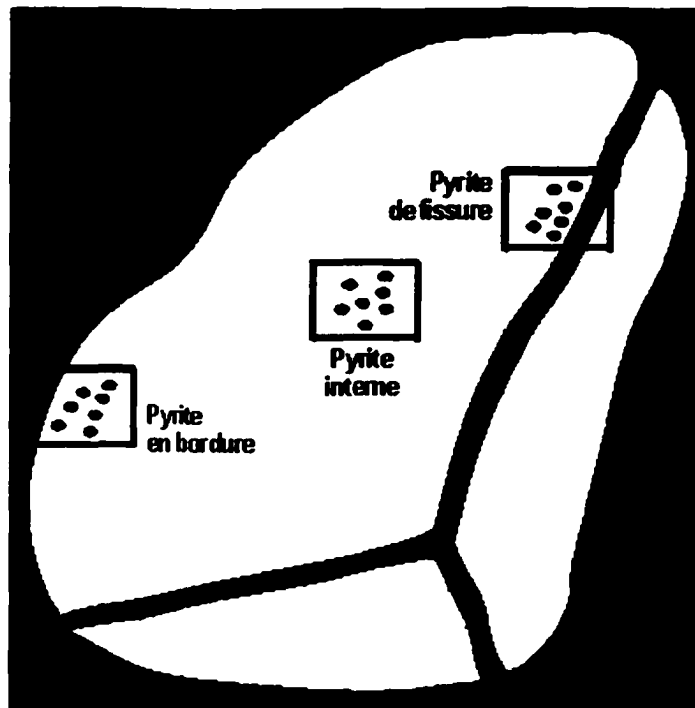


Figure 3.9 Localisation des pyrites dans les granulats

Les pyrites situées en bordure des granulats à la suite du concassage sont plus exposées à l'oxydation. Les pyrites de fissures sont quant à elles situées au bord des fissures naissantes et à la suite de l'infiltration d'humidité et d'oxygène le long des fissures deviennent aussi vulnérables à l'oxydation. Étant localisées au cœur des granulats calcaires, les pyrites internes sont protégées par la matrice et sont donc moins exposées à l'oxydation.

Les données exposées dans ce chapitre ont mis en évidence les paramètres clés qui régissent l'oxydation de la pyrite, l'expansion du remblai et la sulfatation du béton. La maîtrise de tous ces paramètres fondamentaux permettra de simuler au mieux l'expérimentation.

4 MÉTHODOLOGIE D'ÉTUDE DU POTENTIEL EXPANSIF DES CONCASSÉS

Ce chapitre fait office de description de la méthodologie mise à profit allant de l'état des connaissances actuelles jusqu'à l'analyse des résultats obtenus.

4.1 Approche générale

L'étude du potentiel expansif des concassés pyriteux est très complexe. Le résultat final de l'étude dépend de plusieurs paramètres. Ces derniers sont principalement liés aux caractéristiques des matériaux utilisés et aux conditions du milieu où se déroule l'essai.

La connaissance des propriétés physico-mécaniques, chimiques et minéralogiques est indispensable pour déterminer l'influence de la nature et des propriétés des granulats sur le potentiel expansif de ces derniers. C'est la raison pour laquelle une caractérisation physico-chimique, mécanique et minéralogique a été préalablement menée afin de mieux comprendre le comportement des granulats vis-à-vis de l'essai de gonflement.

La première partie du présent travail est constituée par une synthèse bibliographique sur la problématique de la pyrite. Les grandes lignes de la revue littéraire ont été détaillées aux chapitre 1 et 2 du présent mémoire.

La deuxième partie concerne l'expérimentation incluant la caractérisation des matériaux utilisés et l'essai de gonflement.

La troisième partie de ce travail englobe l'analyse globale des résultats obtenus en fonction des attentes fixées au départ et des enseignements relatifs à la revue bibliographique. Les attentes escomptées permettront d'évaluer les mesures à prendre pour éliminer les risques de dommage tout en utilisant des remblais dont le potentiel de gonflement a déjà été évalué.

Les points qui seront entrepris et réalisés dans le programme prévu sont montrés dans l'organigramme de la figure 4.1.

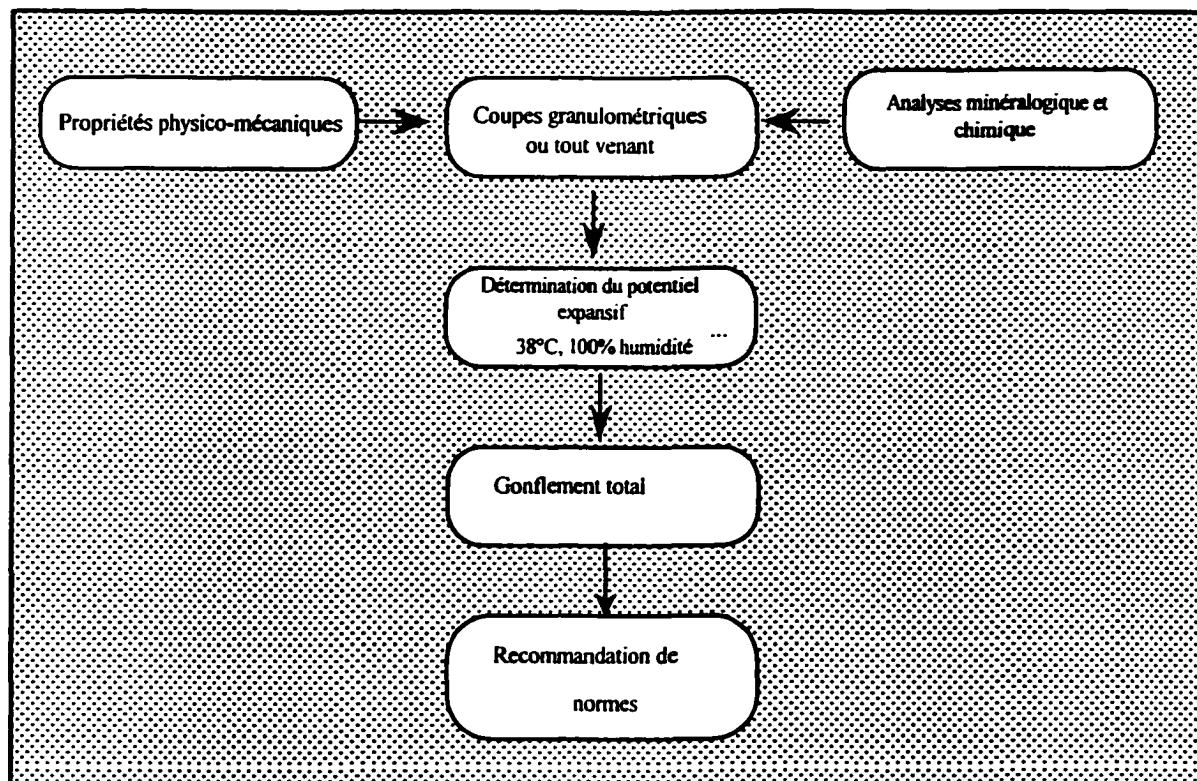


Figure 4. 1 Méthodologie expérimentale adoptée

4.2 Étude sur roches et sur granulats

Huit granulats et roches identifiés par les lettres A, B, C, D, E, F, ME et P provenant des carrières situées dans la province de Québec ont été retenus pour étude. Les granulats désignés par P ont été choisis comme échantillons témoins réactifs tandis que A, B, C, D, E, et F sont des échantillons de référence fournis par le comité technique chargé d'étudier la problématique de la pyrite. Pour certains granulats (ME), des blocs ont été reçus dans lesquels des carottes cylindriques de diamètre NX (52x104 mm) ont été prélevées à l'aide d'une foreuse, pour fins d'essais physiques et mécaniques. L'étude sur roche et granulats est décrite dans l'organigramme de la figure 4.2.

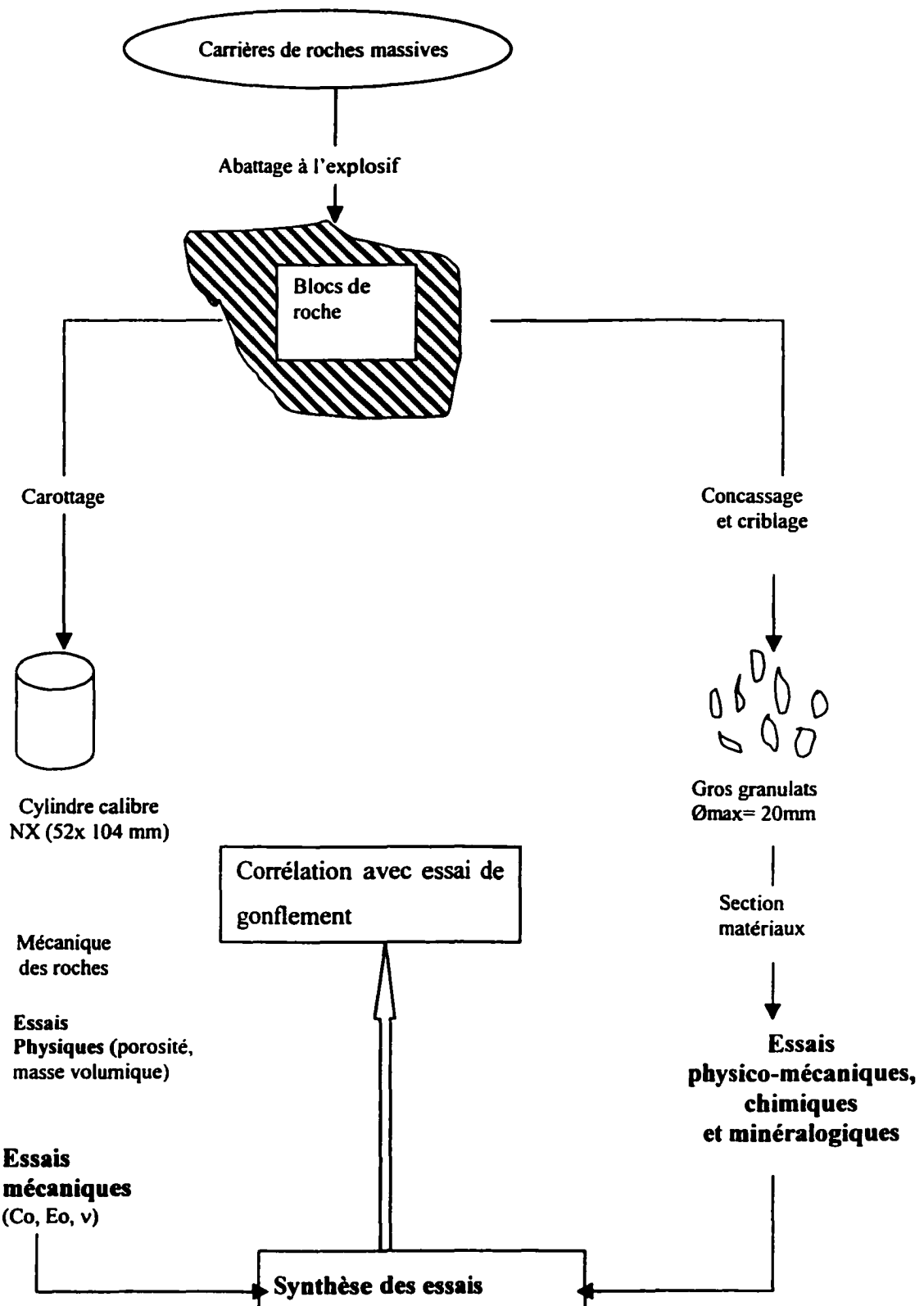


Figure 4.2 Organigramme d'étude sur roche et granulats

Sur l'organigramme de la figure 4.2, on peut voir que les propriétés physico-mécaniques des granulats dépendent en grande partie de la nature des roches mères. En plus des défauts préexistants dans ces roches, il faut ajouter l'endommagement dû au concassage qui développe de nouvelles microdiscontinuités dans les granulats modifiant ainsi leurs propriétés mécaniques.

4.2.1 Caractérisation physico-mécanique

Les essais physico-mécaniques usuels appliqués pour qualifier les propriétés des granulats gonflants ont été mis à profit selon les normes ASTM et BNQ, et ce, conformément au protocole d'essais CTQ-M100 élaboré par le comité Technique Québécois sur les problèmes de la pyrite.

Outre la granulométrie, les propriétés physico-mécaniques s'apparentent entre autres à l'essai micro-Deval, qui caractérise le comportement des granulats vis-à-vis de l'attrition. La détermination de la résistance à l'attrition pour les fractions supérieures à 5 mm sera réalisée selon la norme NQ 2560-070 et les grades C ou D seront considérés. Par contre, pour les fractions plus fines, la norme LC 21-101 a été utilisée. La densité et l'adsorption ont été déterminées selon la norme NQ 2560-067 pour les fractions supérieures à 5 mm (pierre nette et criblure) et selon la norme NQ 2560-065 pour les fractions inférieures à 5 mm. La mise à contribution de la norme NQ 2560-450 a permis d'atteindre l'évaluation de la durabilité des granulats vis-à-vis de la désagrégation due à la cristallisation de sulfates de magnésium simulant le gel-dégel.

4.2.2 Caractérisation chimique et minéralogique

En plus des analyses conventionnelles (analyses chimiques, pétrographiques, etc.), l'analyse par diffraction des rayons X (DRX) a permis l'accès à l'identification des phases minéralogiques présentes dans les granulats (carbonates, minéraux argileux), et prédominantes dans les systèmes considérés.

Le potentiel de génération de groupements sulfates sera aussi défini, car après interaction chimique, ils sont tenus responsables de l'accroissement volumique.

D'autre part, il peut exister des granulats générateurs d'acide sans pour autant que cela provoque de gonflement [BELLALOUÏ et coll., 2000]; dans ce cas, les sulfates néoformés interagissent avec la dalle de béton (action sulfatique) en entraînant un vieillissement rapide. Pour ce faire, la mise à profit d'un appareillage d'extraction du type Soxhlet est utile afin de répondre de façon adéquate à cette particularité.

4.3 Mesure du potentiel expansif des concassés pyriteux

Après la première étape de caractérisation des granulats basée sur l'examen pétrographique, les essais mécaniques et les analyses chimiques, il s'avère indispensable de connaître le comportement des granulats envers l'essai de gonflement. Pour ce faire, deux moules conformes aux dimensions du moule CBR sont proposés, à savoir un moule métallique et un autre en PVC rigide.

Le potentiel de gonflement sera évalué dans un milieu où les conditions environnementales sont similaires aux conditions du milieu naturel. L'essai sera respecté en ce qui a trait au granulat (compactage), au conditionnement de l'échantillon (humidité et température) et à la population bactérienne. Le principe de l'essai consiste à accélérer, dans un conditionnement particulier (humidité et température contrôlées respectivement à 100% et 38°C), les phénomènes d'oxydation de la pyrite qui se produisent dans les granulats et à mesurer les valeurs de gonflement ainsi que, le cas échéant, les pressions latérales développées par le gonflement des matériaux.

4.4 Analyse des résultats

L'analyse des résultats tiendra compte de la synthèse bibliographique et sur les propriétés intrinsèques des matériaux.

La méthodologie proposée constitue donc une étape importante pour la présente étude, car elle indique toutes les démarches à suivre pour arriver à de bons résultats.

5 CARACTÉRISATION DES GRANULATS UTILISÉS POUR ESSAIS DE GONFLEMENT

Les propriétés intrinsèques des granulats pyriteux influencent à divers degrés l'oxydation de la pyrite et le gonflement des remblais de fondation. Parmi ces propriétés figurent principalement les caractéristiques mécaniques et absorbantes ainsi que l'attaque chimique des granulats.

Avant la détermination du potentiel expansif, toute une panoplie de techniques a été mise en œuvre pour caractériser l'ensemble des concassés. Parmi ces techniques figurent la diffraction par les rayons X (DRX), les analyses chimiques, les analyses physiques, l'essai Micro-Deval, l'essai Los Angeles et l'essai de désagrégation aux sulfates de magnésium.

L'objectif visé par cette caractérisation est d'atteindre les propriétés intrinsèques des granulats afin de pouvoir faire une corrélation avec le comportement au gonflement généré par la présence des sulfures.

Les granulats faisant l'objet de la présente caractérisation proviennent des carrières de la région de Montréal, du Québec et de leurs environs. Huit échantillons dénommés A, B, C, D, E, F, ME et P ont fait l'objet de la présente étude. Les six premiers échantillons (A, B, C, D, E, F) sont des échantillons de référence et ont été fournis par le Comité Technique Québécois (CTQ) dans le cadre de la campagne de recherche sur l'étude de la problématique de la pyrite. L'échantillon P, reconnu comme granulats gonflant, a été utilisé comme échantillon témoin [LMRGA¹]. Les concassés A et P sont des shales tandis que les concassés B, D, E, et ME sont des calcaires. Les concassés C et F quant à eux constituent respectivement une cornéenne et une dolomie argileuse.

La caractérisation des granulats a été réalisée sur des matériaux passant à 20 mm et dans certains cas (ME), des essais mécaniques ont été effectués sur des carottes de diamètre NX (52 x 104 mm). La réalisation des essais a été faite selon les normes ASTM et BNQ et conformément au protocole provisoire d'essais connu sous la désignation de CTQ-M100, mis en place par le Comité Technique Québécois chargé d'étudier la problématique de la pyrite.

¹ Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée

Dans les sections suivantes, nous présenterons les différents essais effectués, les normes suivies et les résultats obtenus.

5.1 Analyse chimique des granulats

Pour qu'il y ait oxydation de la pyrite et gonflement d'un remblai constitué de granulats pyriteux, certaines conditions propices doivent être réunies. Ces dernières concernent notamment la présence en quantités suffisantes de pyrite, de carbonates de calcium et ou d'autres minéraux réactifs. Les analyses chimiques effectuées ci-dessous mettent en évidence le pouvoir de génération et de neutralisation acide des granulats étudiés.

5.1.1 Détermination du potentiel net de neutralisation

À partir de la teneur totale en soufre et en carbonates, le potentiel de génération acide et le potentiel de neutralisation ont été évalués en appliquant la méthode adoptée pour les résidus miniers acides selon les relations suivantes :

Potentiel de génération acide (PGA) = $31,25 \times \text{soufre total (\%)}$

Potentiel de neutralisation (PN) = $8,33 \times \text{carbone total (\%)}$

- Potentiel net de neutralisation (PNN) = Potentiel de neutralisation – Potentiel de génération acide

Le tableau 5.1 présente les résultats issus de ces analyses et les teneurs en carbonates obtenues par analyse thermogravimétrique.

TABLEAU 5.1 RESULTATS DU POTENTIEL DE GÉNÉRATION ACIDE ET DE NEUTRALISATION

Échantillon	Soufre (%)	PGA gCaCO ₃ /kg	Carbone (%)	PN gCaCO ₃ /kg	PNN gCaCO ₃ /kg
A	0,58	18,13	2,52	20,99	2,86
B	0,33	10,31	9,82	81,77	71,46
C	0,70	21,88	0,96	7,99	-13,89
D	0,33	10,31	9,77	81,38	70,07
E	0,32	10	8,33	69,37	59,37
F	0,42	13,12	9,84	81,97	68,85
ME	0,33	10,31	9,35	77,92	67,61
P	1,14	35,63	3,18	26,50	-9,13

L'analyse des résultats obtenus pour le concassé C, révèle un potentiel négatif, donc un potentiel générateur acide. Par conséquent, la majorité des sulfates générés par la réaction d'oxydation de la pyrrhotite sont susceptibles d'être largués dans le milieu aqueux, d'où le risque de sulfatation de la dalle. Comme il existe un faible potentiel de neutralisation (7,99 kg CaCO₃/T), une expansion peut avoir lieu; cependant, son action est de moindre importance. Au contraire, les concassés B, D, E, F et ME sont caractérisés par un haut pouvoir de neutralisation, montrant ainsi un caractère plutôt gonflant. Pour les shales A et P, les teneurs en carbonates sont modérées par rapport à la concentration résiduelle en soufre. Dans ce cas, un comportement intermédiaire est plausible incluant un processus de gonflement associé à une action sulfatique envers la dalle de béton.

5.1.2 Détermination du potentiel de génération des sulfates

Afin de déterminer le potentiel générateur de sulfates, la mise en œuvre d'un extracteur type Soxhlet s'est avérée un outil indispensable pour l'évaluation du potentiel de génération

sulfatique. La procédure expérimentale adoptée consiste à introduire 50 g d'échantillon passant le tamis 5 mm dans une cartouche adaptée au *Soxhlet*. Un volume de 200 ml d'eau deionisée est utilisé pour extraction. La procédure adoptée consiste en quatre cycles d'extraction où chaque cycle correspond à un nombre précis de retours du liquide dans le ballon après contact direct avec le solide. Les résultats obtenus pour les concassés A, C, D et P sont reportés dans le tableau 5.2.

TABEAU 5.2 ÉVOLUTION DU PH ET DU POTENTIEL DE GÉNÉRATION DE SULFATES

Paramètres	pH				Sulfates (mg/l)			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Nombres de cycles								
Échantillon A	7,03	7,98	8,68	9,00	100	170	190	210
Échantillon B	7,11	7,73	8,87	8,45	42	100	130	100
Échantillon C	6,07	6,96	8,84	8,50	90	110	120	140
Échantillon D	7,66	8,54	9,24	8,71	36	41	47	31
Échantillon E	7,55	8,66	9,35	9,00	90	74	68	90
Échantillon F	7,60	8,02	8,71	8,30	41	55	69	70
Échantillon ME	7,07	7,44	8,94	8,90	180	210	210	240
Échantillon P	6,7	8,08	8,67	8,85	17	36	33	25

Dès le premier cycle, deux échantillons manifestent des pH inférieurs à la neutralité, surtout le concassé C (cornéenne), échantillon relativement dépourvu de carbonates. Cette valeur rallie parfaitement les résultats obtenus sur le potentiel net de neutralisation, où il est apparu un potentiel générateur d'acide pouvant sulfater la dalle en béton par interaction chimique avec les aluminates contenus dans le ciment. Les shales A et P manifestent des pH relativement similaires; par contre, le pouvoir de génération sulfatique accuse une évolution tout à fait différente avec un

facteur 3 qui sépare les deux concassés. Ce surplus de potentiel générateur de sulfates montre qu'une quantité non négligeable de sulfates peut être combinée avec les ions calcium pour former du gypse. En outre, il faut insister sur le fait que la réaction dépend étroitement de la granulométrie des solides, donc de l'importance de la surface spécifique, puisque la réaction s'apparente à une interaction de contact hétérogène mettant en jeu un solide (sulfures) et des gaz (oxygène et humidité). La comparaison entre les calcaires argileux D et ME laisse apparaître une nette différence dans la génération sulfatique, puisqu'un facteur d'au moins 5 sépare les deux concassés même s'ils sont caractérisés par des propriétés physico-chimiques et mécaniques identiques. Cette particularité peut être reliée à une teneur importante en sulfates dans ME, espèce formée probablement durant le stockage. Dotée de propriétés adéquates, la dolomie F manifeste un comportement relativement comparable aux calcaires E et B.

5.2 Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X demeure un moyen efficace pour identifier les phases cristallines présentes dans les granulats.

5.2.1 Principe de la diffraction des rayons X

La diffraction des rayons X a permis de déterminer les phases cristallines présentes dans les matériaux à partir de leur propriétés telles que les distances entre les plans réticulaires et les intensités correspondantes. Le principe consiste à irradier un échantillon de poussière par un faisceau monochromatique de sorte que les différentes phases cristallines diffractent à différents angles de rotation θ .

Sous une radiation monochromatique à certains angles d'incidence θ , les atomes du plan réticulaire réfléchissent le faisceau de rayons X selon des directions caractéristiques aux phases minérales. L'intensité d'un pic correspond à la sommation du nombre de directions diffractées selon une phase parallèle enregistrées numériquement en coups par seconde. La détermination des angles 2θ permet de trouver les distances entre les différents plans réticulaires et, ainsi, de

déduire les phases minérales présentes par comparaison aux fiches ASTM déjà établies sur les propriétés des différents minéraux par la relation de BRAGG :

$$2d.\sin\theta = k.\lambda \quad (5-1)$$

avec λ : longueur d'onde de la radiation utilisée
 d : distance interréticulaire entre les plans hkl
 $k=1$ (un plan réticulaire)

L'identification des phases minéralogiques a été réalisée à l'aide d'un diffractomètre automatique Rigaku utilisant la radiation K_{α} du cuivre dont la longueur d'onde est $\lambda = 1,5418\text{\AA}$, avec une vitesse de balayage de $2^{\circ}/\text{min}$ en explorant le domaine angulaire compris entre 5 et 80 degrés en 2θ . Un ensemble informatisé relié au système permet l'acquisition et le dépouillement des résultats à l'aide de logiciels incorporant les fiches ASTM du journal JCPDS.

5.2.2 Préparation de la poudre

La poudre soumise aux rayons X est obtenue par le broyage de fragments des granulats. En fait, quelques granulats ont été sélectionnés par quartage afin d'obtenir un échantillon représentatif. Le résultat du broyage avec le mortier est une poudre de roche dont la granulométrie varie de 5 à 30 μm . La poudre ainsi broyée est placée dans un porte-échantillon en aluminium (ouverture de 18 x 20mm). Afin d'éviter une orientation préférentielle des cristaux, une lamelle dépolie (rugueuse) est disposée sous le porte-échantillon. La poudre est alors déposée dans l'ouverture du porte-échantillon sur cette lamelle dépolie. Enfin, on s'appuie vigoureusement sur la poudre avec une petite presse. La poudre tient seule en raison de sa finesse, qui lui confère une forte cohésion interne. Les spectres des différents échantillons sont donnés dans l'annexe C du présent mémoire tandis que le résumé des principales phases est donné dans le tableau 5.3.

5.2.3 Analyse des spectres

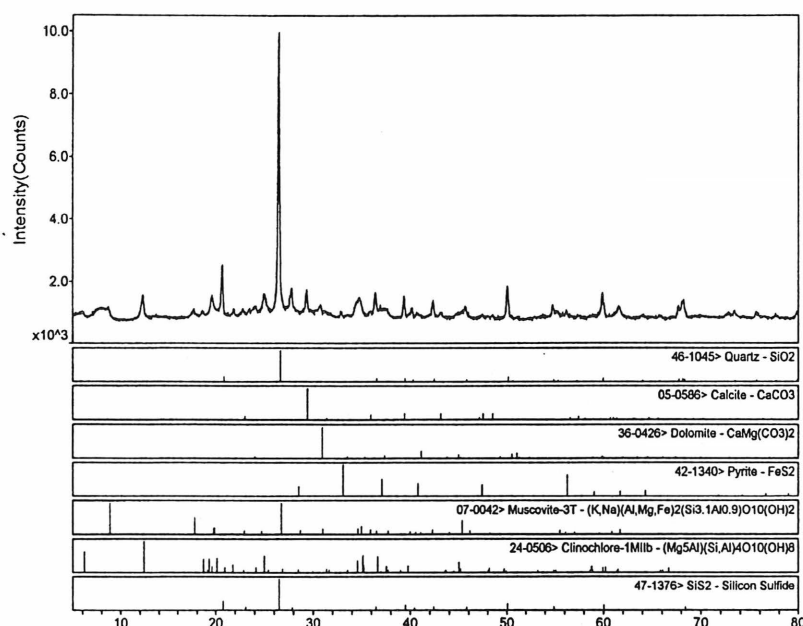


Figure 5.1 Spectre des rayons X pour le shale A (intensité vs 2θ)

Par l'analyse du spectre de la figure 5.1, on a distingué la présence de trois phases principales : la calcite (CaCO_3), la dolomite ($\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$) et la silice (SiO_2). Les limites de détection par cette technique ne permettent pas de détecter correctement les phases minoritaires comme les sulfures. Toutes les phases mentionnées dans le tableau 5.3 sont relevées dans les shales A et P. La mise en évidence des phases mineures telles que les sulfures a été rendue plus aisée par l'apport d'un extracteur utilisant des produits chimiques appropriés (tensioactifs) pour la séparation par flottation. Les phases minéralogiques mises en évidence par diffraction des rayons X sont rassemblées dans le tableau 5.3, où les multiples en signe + indiquent l'importance de la présence des phases identifiées dans le mélange tout en restant sommairement semi quantitatifs. En effet, une quantification requiert une taille optimale des cristallites, Cependant, dans le cas présent, une supposition peut être prise en compte et se résume par l'existence d'une erreur systématique pour

l'ensemble des comparaisons. Les spectres réalisés pour d'autres échantillons sont donnés dans l'annexe C.

TABLEAU 5.3 RÉSULTATS D'ANALYSES CHIMIQUES ET MINÉRALOGIQUES

Minéraux Échantillon	Silice SiO ₂	Calcite CaCO ₃	Muscovite	Chlorite	Dolomite CaMg(CO ₃)	Pyrite FeS ₂	Nature des concessés
A	+++++	+++	++	++	++	+	Shale argileux
B	++++	+++++	-	-	++++	+	Calcaire argileux
C Cornéenne	+++	++	++	-	-	$Fe_{1-x}S$ pyrrhotite	Cornée nne
D	+++	+++++	+	-	+	+	Calcaire argileux
E	+++	+++++	++	++	-	+	calcaire
F	++	++++	-	-	-	+	Dolomie argileuse
P	+++++	++	+++	++	+	+	shale
ME	+++	+++++	++	++	++	+	Calcaire argileux

Les observations essentielles qui émergent des résultats obtenus se résument par la présence de la pyrrhotite dans le cas de l'échantillon C (cornéenne) contrairement aux autres concassés comportant de la pyrite. Sur le spectre de DRX (annexe C), il apparaît de très faibles teneurs en calcite et une absence totale de la dolomite dans le concassé C.

5.3 Essais physico-mécaniques des granulats étudiés

Les paramètres physiques et mécaniques des granulats peuvent influencer à divers degrés le taux de réaction et le gonflement des remblais granulaires pyriteux. Il s'agit principalement de la granulométrie en étroite relation avec la surface spécifique et du degré de compaction régulant l'importance de la présence des réactifs gazeux.

5.3.1 Granulométrie

La granulométrie est un paramètre déterminant pour la réactivité des matériaux. Elle est responsable de bon nombre de propriétés physiques, par exemple la compacité, la perméabilité, la réactivité et le comportement au gel [AÏTCIN et coll., 1983]. Plus un granulat est grossier, plus il est perméable, et, plus il est fin, moins il est perméable d'autant sa réactivité est importante en supposant que le système est loin de la saturation. La réactivité de la pyrite contenue dans les granulats dépend donc des propriétés physiques des granulats et en particulier de leur surface spécifique étroitement liée à la répartition granulométrique.

La répartition granulométrique a été réalisée par tamisage du gros granulat et du granulat fin selon la norme NQ 2501-025. Les courbes granulométriques des échantillons analysés sont rassemblées dans les figures 5.2 à 5.6.

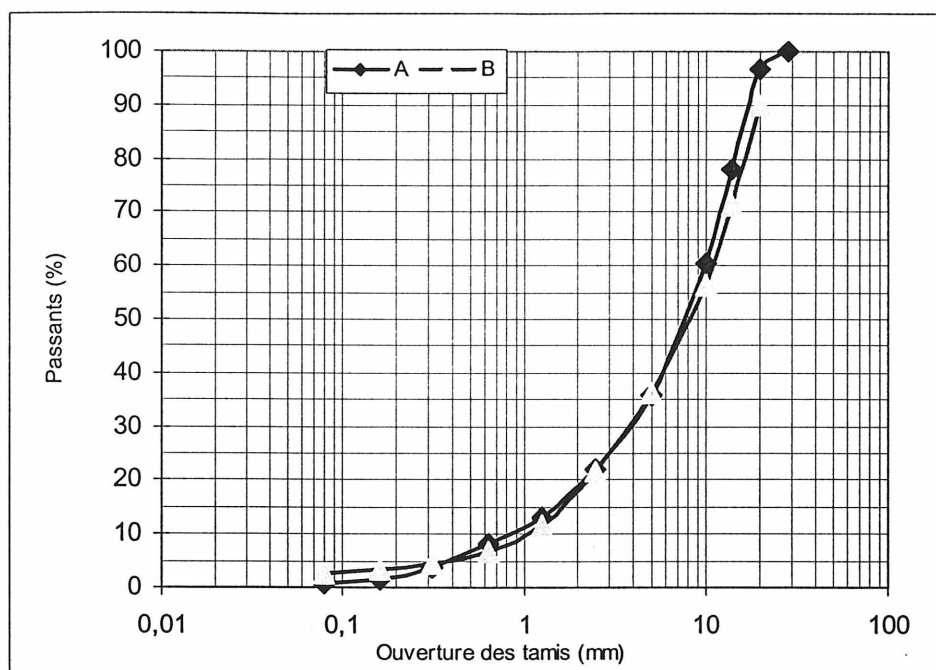


Figure 5.2 Courbes granulométriques pour le shale A et le calcaire B

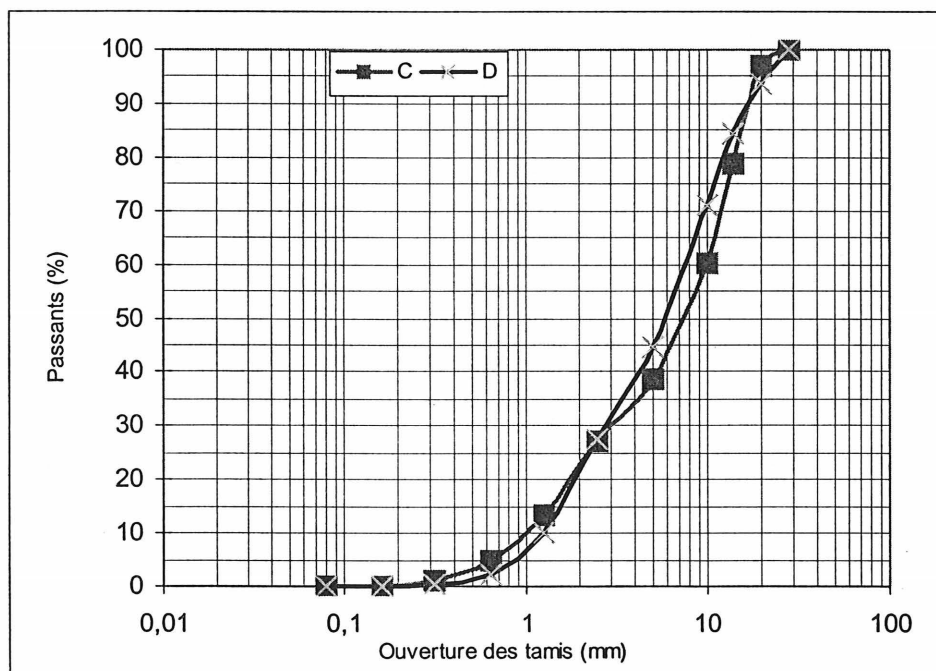


Figure 5.3 Courbes granulométriques pour la cornéenne C et le calcaire D

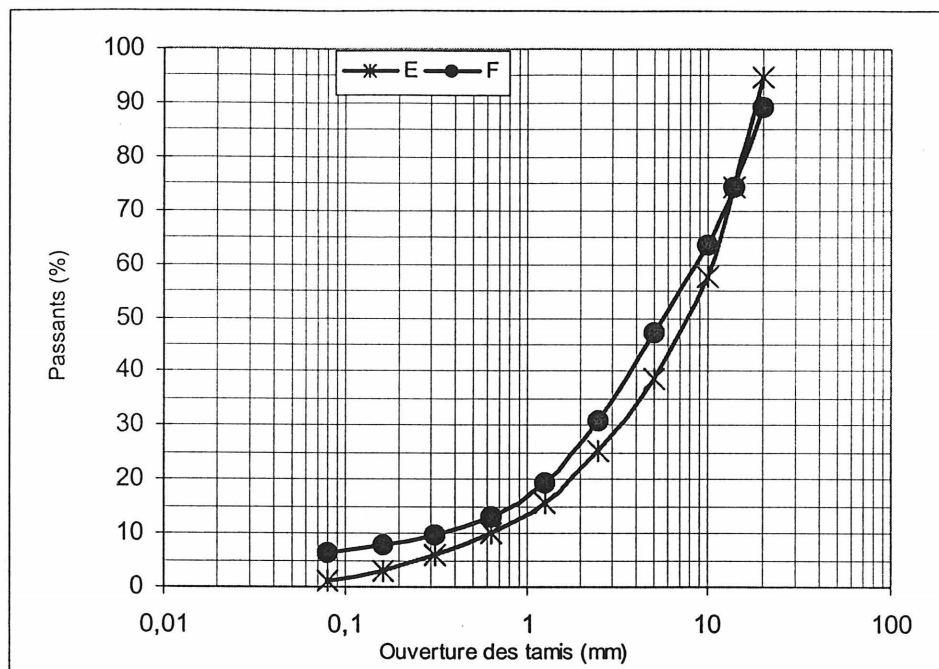


Figure 5.4 Courbes granulométriques pour le calcaire E et la dolomie F

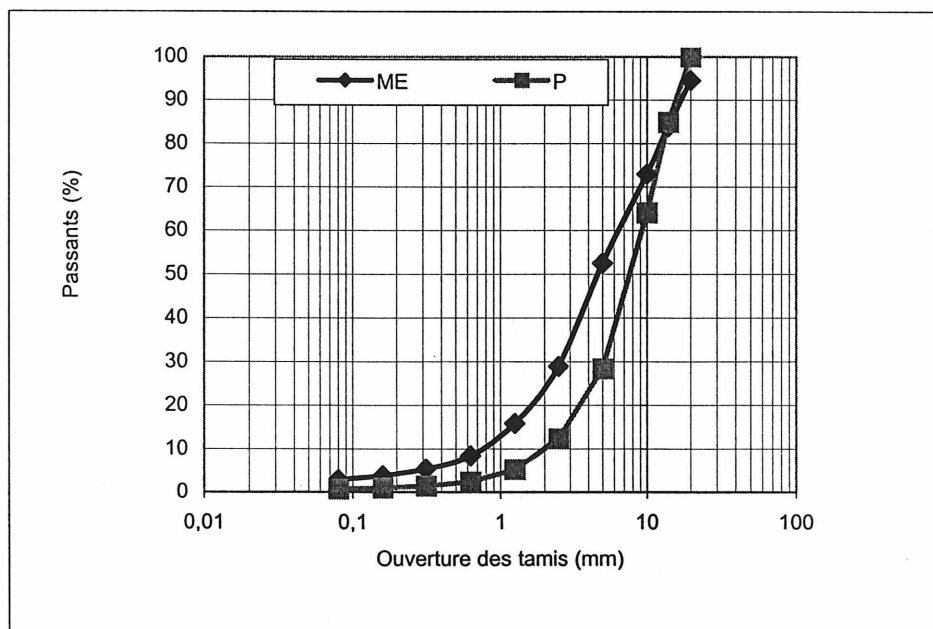


Figure 5.5 Courbes granulométriques pour le calcaire ME et le shale P

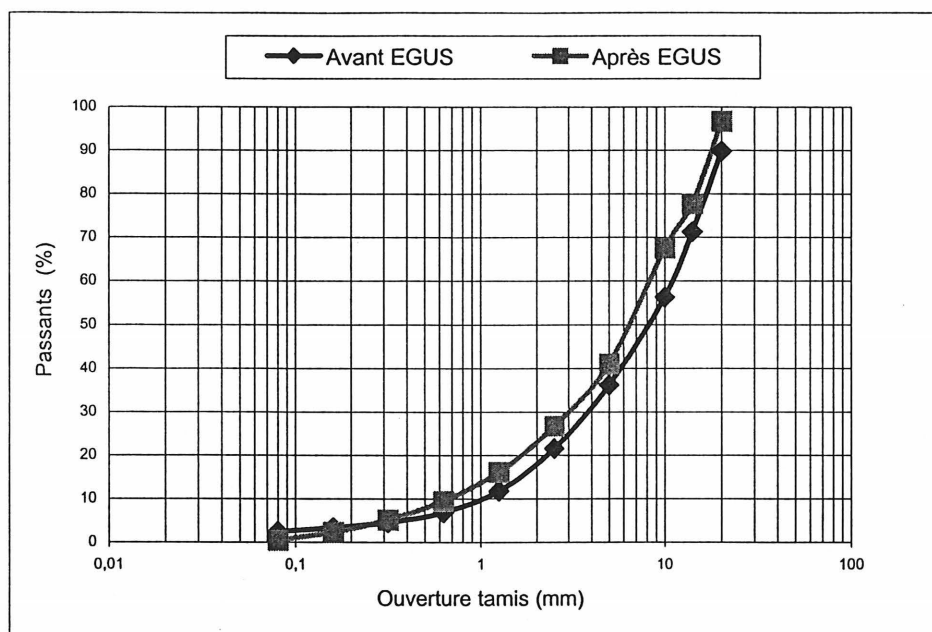


Figure 5.6 Courbes granulométriques pour le calcaire B avant et après essai de gonflement

Les courbes de la figure 5.6 montrent qu'après l'essai de gonflement, la granulométrie de l'échantillon B manifeste une légère fluctuation à la suite du compactage. Cependant, pour les shales A et P, une variation significative où une réduction d'au moins 50 % de la granulométrie est perceptible à ce niveau (essais réalisés séparément de l'essai de gonflement). En somme, le comportement physico-mécanique des concassés conditionne fortement les variations.

La détermination des coefficients d'uniformité C_u , du coefficient de courbure C_c et du module de finesse M_f a permis de caractériser d'une façon quantitative la distribution granulométrique des particules.

Connaissant les diamètres spécifiques correspondant aux tamisats de 10, 30 et 60 %, les coefficients C_u et C_c ont été calculés à l'aide des deux équations suivantes :

$$C_u = d_{60} / d_{10} \quad \text{et} \quad C_c = (d_{30})^2 / (d_{60} \cdot d_{10}) \quad (5-2)$$

Où : d_{10} , d_{30} et d_{60} sont des diamètres spécifiques correspondant respectivement aux tamisats cumulés de 10, 30 et 60 %.

Le module de finesse du sable M_f est donné par la somme des pourcentages des refus cumulés sur les tamis 5-2, 5-1, 25 mm; 630-315-160 μm , et le total est divisé par 100. Les valeurs des coefficients C_u , C_c et M_f sont données dans le tableau 5.4.

TABLEAU 5.4 NOTIONS DÉRIVÉES DES RÉSULTATS DES ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES

Échantillon Propriétés	Shale (A)	Calcaire argileux (B)	Cornéenne (C)	Calcaire argileux (D)	Calcaire (E)	Dolomie argileuse (F)	Calcaire argileux (ME)	Shale (P)
Module de Finesse	5,2	5,2	5,1	5,2	5,0	4,7	4,4	5,5
Coefficient d'uniformité (C_u)	7	11	10	5	18	28	8	5
Coefficient de courbure (C_c)	1,1	1,1	0,9	0,7	1,5	3,5	1,3	1,4

Selon les résultats de l'analyse granulométrique et en se basant sur la norme NQ 2560-040/1982, les matériaux étudiés peuvent être classés en trois catégories :

- gravier fin propre à granulométrie semi-étalée (A, B, F, E, ME);
- gravier fin non propre à granulométrie semi-étalée (C, D);
- gravier fin propre à granulométrie serrée (P).

Les résultats de l'analyse granulométrique donnent des indications sommaires sur la réactivité de la pyrite présente dans ces granulats et aussi sur le degré de compaction du remblai.

5.3.2 Densité et adsorption

La quantité d'eau adsorbée par les granulats permet de mieux comprendre le mécanisme d'interaction physique entre l'eau et les granulats, et constitue un facteur important quant au degré de désintégration des granulats initié par l'apparition de microfissures se développant jusqu'à la friabilité totale des granulats. En général, les particules des granulats sont poreuses et peuvent adsorber une certaine quantité de liquide. Les pores fermés ne communiquent pas avec l'extérieur. Les pores ouverts débouchent sur la surface extérieure des granulats tandis que les pores superficiels sont présents en surface. Seuls les pores ouverts ou superficiels se saturent ou sont partiellement imbibés lorsque la particule adsorbe un liquide. L'adsorption d'une particule est égale au rapport entre la masse de liquide adsorbé à l'état SSS et la masse sèche de la particule. Ici, l'état SSS est un état saturé superficiellement sec quand tous les pores ouverts et superficiels présentent un ménisque à la surface extérieure de la particule. La densité est définie comme étant le rapport, à une température donnée, entre la masse dans l'air d'une unité de volume d'un matériau perméable incluant à la fois les vides perméables et ceux imperméables (densité brute) ou excluant les vides (densité apparente), cela dans les conditions normales, et la masse dans l'air de même densité, d'un égal volume d'eau distillée et débarrassée de tout gaz, mais toujours à la même température donnée.

Les mesures de la densité et de l'adsorption ont été réalisées selon la norme NQ 2560-076 pour les fractions supérieures à 5 mm et selon la norme NQ 2560-065 pour les fractions inférieures à 5 mm. Les résultats des essais sont présentés au tableau 5.6. La porosité (n) a été calculée à l'aide de l'équation (5-3) et les résultats de calcul figurent dans le tableau 5.8.

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad (5-3)$$

Où :

ρ_d : masse volumique de l'échantillon sec (Mg/m^3);

ρ_s : masse volumique des grains solides de l'échantillon sec (Mg/m^3);

5.3.3 Désagrégation par une solution de sulfate de magnésium

À la suite d'une série de cycles de mouillage-séchage, il se produit une augmentation de la fissuration et, par conséquent, de la capacité d'adsorption. L'augmentation graduelle de la surface interne devient donc irréversible et chacune des fissures maintenant ouvertes occupe un espace supplémentaire, contribuant de cette façon à l'expansion et à l'attaque chimique.

La désagrégation des granulats par une solution de sulfate de magnésium permet de simuler le mécanisme d'altération par des poussées exercées par la cristallisation du sel de magnésium à l'intérieur des granulats. Cet essai consiste à faire subir une prise d'essai de gros granulats ou de granulats fins à un nombre de cycles d'immersion et de séchage dans une solution saturée de sulfate de magnésium. Le résultat de l'essai est exprimé en pourcentage de perte par rapport à la masse initiale. L'essai a été exécuté selon la norme BNQ 2560-450 et la durée adoptée est de 16 heures par cycle. Après avoir répété les opérations d'immersion et de séchage, le nombre de cycles requis a été fixé à cinq étant donné que la variation de perte de masse pour deux essais successifs n'excède pas 0,1 %.

Le phénomène de détérioration par une solution de sulfate de magnésium est attribué principalement à la fissuration interne. La désagrégation interne est généralement liée aux pressions internes causées par la cristallisation de MgSO_4 dans les pores des granulats. Cet essai donne de bonnes indications sur le comportement des granulats vis-à-vis de la cristallisation du gypse formé à la suite de la neutralisation de l'acide sulfurique par les carbonates au cœur des granulats facilité par la présence de fissures prenant naissance en surface. Les résultats des essais sont compilés dans le tableau 5.5.

TABLEAU 5.5 PARAMÈTRES PHYSIQUES DES GRANULATS

Échantillon Propriété		Shale (A)	Calcaire (B)	Cornée nne (C)	Calcaire argileux (D)	Calcaire (E)	Dolomie argileuse (F)	Calcaire argileux (ME)	Shale (P)
Adsorption (%)	<5mm	4,9	3	2,1	2,2	2,6	1,9	3,2	4,93
	>5mm	2,8	0,9	0,4	0,9	1	0,7	1,0	3,7
Densité apparente (ρ_s)	<5mm	2,81	2,73	2,81	2,73	2,75	2,83	2,74	2,78
	>5mm	2,80	2,72	2,80	2,72	2,74	2,82	2,73	2,78
Perte par MgSO ₄ (%)	<5mm	77	23	2	23	27	8	20	82
	>5mm	54	15	1	15	23	2	17	62
Densité brute	>5mm	2,28	2,20	2,13	2,21	2,25	2,34	2,66	2,53
Densité SSS	>5mm	2,39	2,31	2,23	2,32	2,35	2,43	2,68	2,62

Dans la norme de contrôle qualitatif des granulats pour la construction routière, la valeur limite du coefficient d'adsorption est fixée à 3 %. Les granulats qui dépassent ce pourcentage sont donc susceptibles d'adsorber beaucoup d'eau, ce qui risque d'augmenter la pression à l'intérieur des granulats et, par conséquent, de favoriser leur vulnérabilité par attaque chimique. Selon les normes canadiennes sur la qualité des granulats pour la construction, le coefficient de perte à la suite de la désagrégation par une solution de sulfate de magnésium est fixé à 20 % (> 5mm) et à 25 % (< 5 mm). En se référant aux résultats du tableau 5.5 et conformément à la norme canadienne sur la qualité des granulats, il appert que les shales A et P ne remplissent pas le critère de sélection tandis que les concassés B, C, D, E et F sont admissibles. Par contre, ces calcaires désignés par B et ME se situent autour de la valeur limite.

5.3.4 Résistance mécanique des granulats : essais Los Angeles et micro-Deval

Les granulats sensibles à l'eau tels les calcaires ou les dolomies argileuses peuvent être sujets à diverses sollicitations mécaniques telles que l'abrasion ou l'attrition durant les travaux de construction ou pendant leur vie en service.

La résistance à l'abrasion d'un granulat est déterminée par la perte de masse lors d'un essai d'usure (essai Los Angeles). Selon la norme BNQ 2560-400, le pourcentage d'abrasion (coefficient Los Angeles) est représenté par la différence entre la masse initiale de la prise d'essai et la masse finale retenue au tamis de 1,70 mm après l'essai, par rapport à la masse initiale.

L'usure par attrition d'un granulat est déterminée à l'aide de l'appareil micro-Deval en présence d'eau. L'essai consiste à provoquer, dans un broyeur contenant des granulats de grosseur déterminée, une attrition en milieu humide par des frottements des granulats entre eux sous une charge abrasive constituée de billes d'acier. Selon la norme NQ 2560-070, le coefficient de perte à l'usure micro-Deval est le pourcentage de particules passant le tamis de 1,25 mm.

Les coefficients Los Angeles et micro-Deval sont de bons indicateurs de la résistance des granulats à la désagrégation mécanique occasionnée par l'abrasion et l'attrition, mais également de leur résistance aux différentes tensions internes et externes générées par la cristallisation des produits secondaires, formés après l'oxydation de la pyrite. Les résultats des essais Los Angeles et micro-Deval sont donnés dans le tableau 5.6.

TABLEAU 5.6 RÉSULTATS DES ESSAIS LOS ANGELES ET MICRO-DEVAL HUMIDE

Échantillon Essai		Shale (A)	Calcaire (B)	Cornéenne (C)	Calcaire argileux (D)	Calcaire (E)	Dolomie argileuse (F)	Calcaire argileux ME	Shale (P)
Los Angeles (%)		30	22	12	23	26	19	23	32
Micro- Deval (%)	<5mm	11	13	11	9	18	9	16	14
	>5mm	90	25	5	33	26	10	29	98

Pour les granulats de fondations, les normes canadiennes acceptent une valeur maximale variant de 32 à 40 % pour le coefficient Los Angeles (*Normes de contrôle qualitatif des granulats pour la construction routière*). D'après les résultats obtenus, on voit que tous les échantillons répondent à ce critère. Quant au coefficient micro-Deval humide, les mêmes normes fixent une limite supérieure à 26 % pour les granulats plus grossiers que 5 mm. Seuls les calcaires (B, E), la cornéenne (C) et la dolomie (F) répondent à la norme. Cependant, les calcaires argileux ME et D manifestent des valeurs légèrement supérieures au critère d'admissibilité (26 %).

5.3.5 Caractéristiques mécaniques de la roche de l'échantillon ME

Les propriétés mécaniques des granulats dépendent en grande partie de l'endommagement naturel et artificiel des roches mères. Plusieurs étapes peuvent entraîner la détérioration d'une roche. Tout d'abord, sous l'action d'un explosif au moment de l'abattage, il y aura une désagrégation mécanique occasionnée par la force de l'explosion et le relâchement des contraintes résiduelles. Puis, l'hydratation, le réarrangement d'argiles par adsorption d'eau et le gonflement dû à la pyrite pourront conduire à la dégradation complète de la roche.

Les paramètres mécaniques : la résistance en compression simple (C_0), le module élastique (E_0), le module de Young (ν) sont fonction des paramètres physiques (densité, porosité, fissuration)

des roches. Une roche moins résistante permet l'accessibilité de la pyrite par les réactifs (oxygène, humidité) et ce contact accélère l'oxydation de la pyrite et la formation de minéraux secondaires gonflants. Les carottes cylindriques ayant servi pour les essais sont de diamètre NX (52x104 mm) et ont été prélevées dans des blocs à l'aide d'une foreuse comme le montre la figure suivante.



Figure 5.7 Carottes de diamètre NX (52 x 104 mm) de l'échantillon (ME)

La détermination de la résistance à la compression simple (C_0) a été effectuée sur une presse hydraulique MTS (*Material Testing Standard*) à servo-contrôle conformément à la norme ASTM D2938-95. Le montage de détermination des paramètres de déformations est montré à la figure 5.8 tandis que le montage et le mode de rupture en compression du calcaire ME sont montrés sur les photos de la figure 5.9. Cet essai a été aussi utilisé pour l'obtention des diagrammes

contrainte-déformation en vue de la détermination des caractéristiques élastiques de la roche : module de Young (E_{s50}) et coefficient de Poisson (ν).

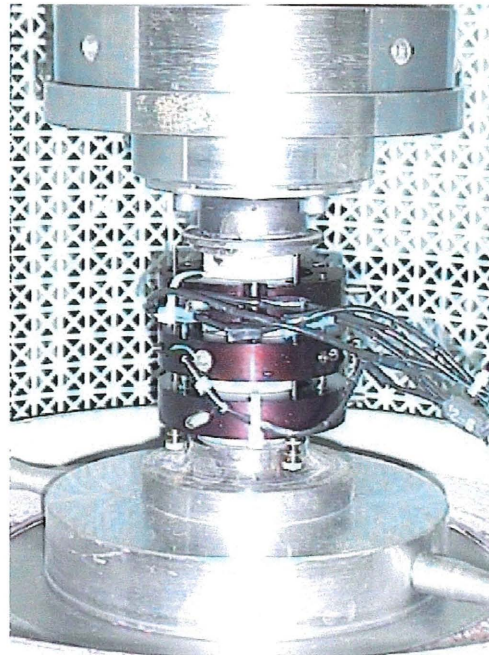


Figure 5.8 Montage pour la détermination des paramètres mécaniques E et ν (ME)



Figure 5.9 Calcaire ME avant et après essai de compression

Les résultats des essais effectués figurent dans le tableau 5.7 et les graphiques sont donnés dans les figures 5.10 et 5.11.

TABLEAU 5.7 RÉSULTATS DES ESSAIS MÉCANIQUES DU CALCAIRE ME
(ASTM D2938-86 ET ASTM D3148-86)

Paramètres	Échantillon ME
C_0 (MPa)	54
E_{s50} (GPa)	54,6
ν	0,25

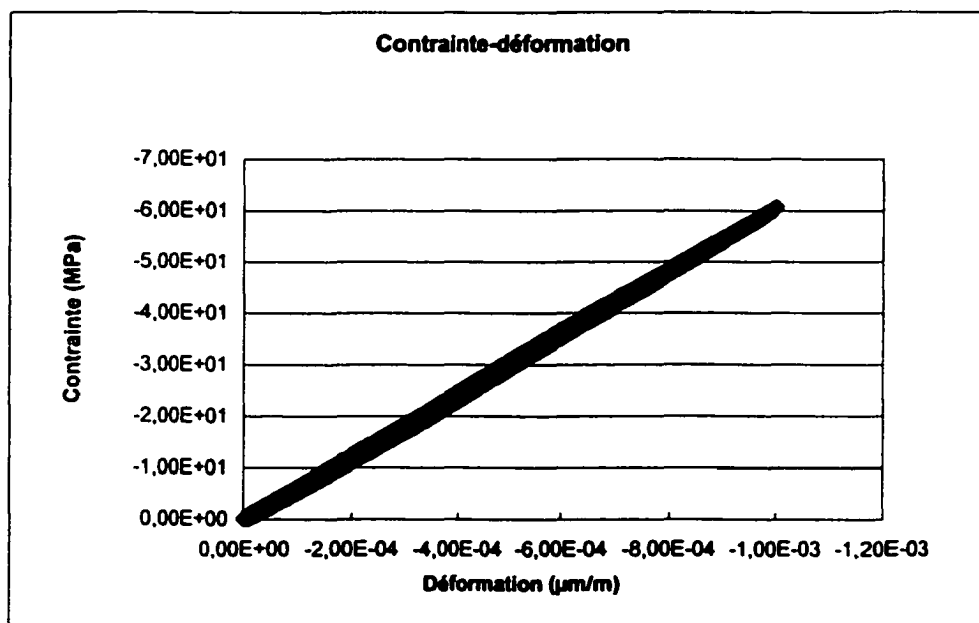


Figure 5.10 Courbe contrainte-déformation du calcaire ME

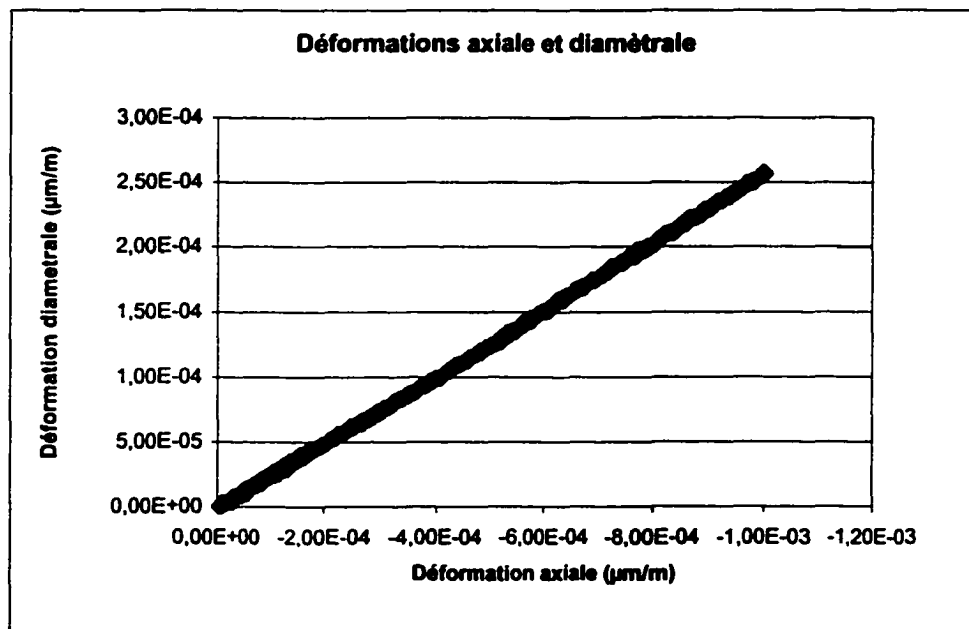


Figure 5.11 Courbe de déformations du calcaire ME

Les résultats des essais mécaniques effectués pour l'échantillon ME montrent que ce dernier présente de bonnes caractéristiques mécaniques. L'échantillon étudié est rigide avec un module élastique de 54,6 Gpa (Module sécant à 50 % de déformations). La déformation de l'échantillon croît linéairement. Ce comportement élastique peut être dû à l'isotropie naturelle de la roche. En somme, et en extrapolant les résultats pour les remblais de fondation, les concassés résultant de ces roches sont acceptables et peuvent être utilisés comme matériaux.

5.4 Effet du compactage sur l'oxydation de la pyrite

Les paramètres de compactage du remblai granulaire, en l'occurrence la perméabilité, le pourcentage de vides et la teneur en eau, jouent un rôle déterminant dans l'oxydation de la pyrite. La détermination de ces paramètres s'avère un moyen efficace pour comprendre le mécanisme de réaction dans le remblai granulaire.

5.4.1 Détermination de la teneur en eau par essai Proctor

L'oxydation de la pyrite se fait en général très difficilement en milieu saturé, car l'oxygène nécessaire aux réactions se diffuse très lentement dans l'eau et sa concentration en phase aqueuse est de 0,8 % contrairement aux 21 % dans l'air. La présence d'eau est un prérequis pour les réactions mais ceci nécessite un milieu humide mais non saturé [BERUBÉ, 1997].

La teneur en eau optimale et la masse volumique in situ jouent un rôle prépondérant dans l'oxydation de la pyrite et, par conséquent, dans le gonflement du remblai. En effet, le gypse et les autres sulfates formés ont tendance à cristalliser localement entre les plans de litages des particules pyriteuses du remblai, les pressions de cristallisation étant suffisantes pour ouvrir davantage ces plans de faiblesse, disloquer la particule et faire gonfler l'ensemble. Toutefois, quand il y a trop d'espaces dans les remblais et à l'intérieur des granulats, il faut un certain temps avant que le gonflement ne s'amorce et, surtout ne devienne perceptible sous la forme de détériorations visibles au niveau de la dalle ou des locaux sus-jacents [BÉRUBÉ, 1997]. Puisque les produits néoformés tendent à combler de préférences les vides intergranulaires avant que la formation ne soit perçue quantitativement en terme expansif.

Les essais Proctor normal et modifié ont été exécutés respectivement selon les normes BNQ 2501-250 et BNQ 2501-255; les résultats obtenus figurent dans le tableau 5.9 et sur les graphiques 5.12 et 5.13. Les paramètres obtenus lors de ces essais ont permis d'évaluer le degré de saturation et l'indice des vides à l'aide des formules (5-4 et 5-5).

$$\rho_d = \frac{\rho_w \cdot Sr}{\omega + \frac{\rho_w}{\rho_s} Sr} \quad [\text{HOLTZ et coll., 1991}] \quad (5-4)$$

Où :

ρ_d : masse volumique du matériau sec (Mg/m^3);

ρ_s : masse volumique des grains solides (Mg/m^3);

ρ_w : masse volumique de l'eau (Mg/m^3);

ω : teneur en eau (%);

Sr : degré de saturation (%).

$$e = \frac{\omega \cdot \rho_s}{\rho_w \cdot Sr} \quad , \text{ (ici on considère que } V_s = 1 \text{ m}^3 \text{)} \quad (5-5)$$

Les résultats des essais pour le calcaire ME sont compilés dans le tableau 5.8. Les quantités de matériaux disponibles n'ont pas permis de déterminer les teneurs en eau optimales ainsi que les masses volumiques sèches maximales pour les autres matériaux. Cependant, la teneur en eau optimale trouvée pour le calcaire ME nous a servi de référence pour fixer la teneur en eau initiale à mettre pour le compactage des autres concassés et, par conséquent calculer les masses volumiques sèches.

Sur les graphiques 5.12 et 5.13 sont reportées les courbes des essais Proctor normal et Proctor modifié pour le calcaire ME.

TABLEAU 5.8 PARAMÈTRES DE COMPACTAGE (BNQ 2501-255)

Échantillon	A	B	C	D	E	F	ME	P
Propriété								
Teneur en eau optimale w (%)	5	5	5	5	4,5	4	4,7 (optimale)	6,4 (optimale)
Masse volumique sèche ρ_d (g/cm ³)	2,28	2,20	2,13	2,21	2,25	2,34	2,31 (optimale)	2,27 (optimale)
Porosité n (%)	18	19	24	19	18	17	15	18
Degré de saturation S_r (%)	52	48	33	48	46	47	49	66
Indice des vides e	0,22	0,23	0,32	0,23	0,22	0,20	0,22	0,22

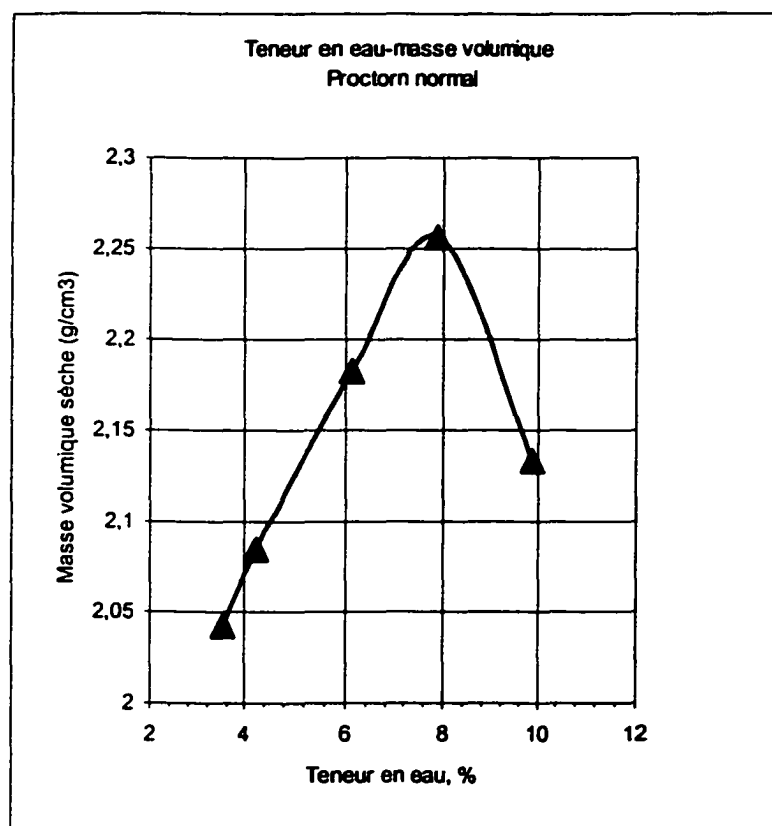


Figure 5.12 Teneur en eau-masse volumique du calcaire ME (Proctor normal)

La courbe Proctor normal de la figure 5.12 donne une masse volumique maximale de $2,252 \text{ g/cm}^3$. À cette valeur correspond la teneur en eau optimale 7,80 %. L'essai de compactage Proctor normal s'effectue avec une énergie de compactage inférieure à celle utilisée pour l'essai Proctor modifié.

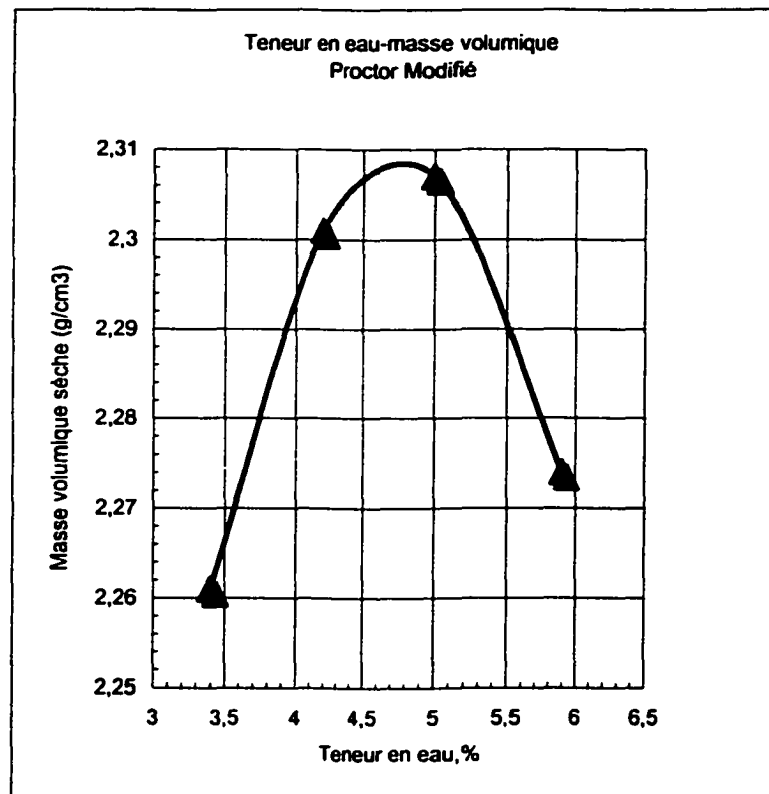


Figure 5.13 Teneur en eau-masse volumique du calcaire ME (Proctor modifié)

La courbe correspondant à l'essai de compactage Proctor modifié donne une masse volumique maximale de $2,308 \text{ g/cm}^3$ à laquelle correspond une teneur en eau optimale de 4,8 %. Comme en témoignent les valeurs trouvées, l'augmentation de l'énergie de compactage se traduit, d'une part, par une augmentation de la masse volumique maximale du sol sec et, d'autre part, par une baisse de la teneur en eau optimale [HOLTZ et coll., 1991]. Les valeurs optimales acquises pour le calcaire ME ont servi de référence pour les autres matériaux étudiés car ils se distinguent de calibres granulométriques sensiblement identiques.

Le compactage a un effet considérable sur le processus de gonflement de la pyrite. Dans un certains cas, il peut jouer un rôle positif pour limiter l'expansion dans le remblai. En effet, si un matériau est trop compacté, il y a diminution du pourcentage de vides intergranulaires. Quand le processus de gonflement est déclenché, le gypse et les autres sulfates ont tendance à cristalliser

dans les vides entre les particules, ralentissant par conséquent le gonflement de l'ensemble du matériau. Toutefois, les pressions de cristallisation sont suffisantes pour ouvrir davantage ces plans de faiblesse et faire gonfler l'ensemble du matériau.

5.5 Discussion des résultats des analyses physiques, chimiques et mécaniques

La compilation des résultats obtenus pour les différents essais physico-chimiques, mécaniques et minéralogiques est donnée dans le tableau 5.9. En tenant compte des critères d'admissibilité retenus par le comité, il apparaît les limites pour lesquels, les différentes propriétés des concassés sont confrontées.

TABLEAU 5.9 RÉSULTATS DE CARACTÉRISATION PHYSICO-CHIMIQUE ET MÉCANIQUE DES GRANULATS

Propriétés	Échantillons								Val. Limite
	A	B	C	D	E	F	ME	P	
MDH > 5	90	25	5	33	26	10	29	98	26
MDH < 5	11	13	11	9	18	9	16	14	26
MgSO ₄ > 5	54	15	1	15	23	2	17	62	20
MgSO ₄ < 5	77	23	2	23	27	8	20	82	25
ADS > 5	2.8	0.9	0.4	0.9	1	0.7	1	3.7	3
ADS < 5	4.9	3	2.1	2.2	2.6	1.9	3.2	4.9	3
LA	30	22	12	23	26	19	23	32	32-40
IPPG	74	14	1	20	14	3	ND	>74	10
	R	A**	A*	A**	R	A	A**	R	

	Valeur acceptable selon la norme canadienne
	Valeur refusée selon la norme canadienne
	Valeur intermédiaire
ND	Non déterminé
A*	Accepté avec utilisation de coupe vapeur
A**	Accepté en pierre nette
R	Refusé

À l'analyse des résultats reportés dans le tableau 5.9, les shales A et P se caractérisent par des propriétés physico-mécaniques moins performantes que les autres concassés, notamment la cornéenne C et les calcaires argileux B, D, ME et aussi vis-à-vis de la dolomie F et du calcaire E. À première vue, cette particularité rend les shales A et P inappropriés à une éventuelle utilisation en tant que remblais de fondation, où leur mise en place peut réduire amplement leur propriétés mécaniques, ce que corroborent parfaitement les essais micro-Deval et Los Angeles. La proximité d'une nappe ou l'infiltration d'effluent, comme en témoignent les essais d'adsorption d'eau, entraîne certainement leur friabilité. Ce comportement multiplie la présence superficielle des sulfures, accroissant ainsi les sites actifs, par conséquent, les réactions d'oxydation et de neutralisation, processus synonyme de gonflement.

La cornéenne C manifeste des propriétés physico-mécaniques acceptables advenant son utilisation dans un remblai de fondation. Cependant, ses propriétés chimiques attestent qu'une mise en garde doit être prise en considération afin d'éviter une sulfatation de la dalle en béton.

En ce qui concerne les calcaire argileux B, D, E et ME en comparaison avec les autres granulats, leur comportement est relativement intermédiaire pour certains paramètres. Il se situe donc dans une zone limite où l'essai de gonflement peut s'avérer indispensable et permettre de définir les conditions d'acceptabilité, sans toutefois pénaliser les carrières situées dans des régions où seulement ce type de granulat est disponible.

La dolomie argileuse F est caractérisée par de meilleures propriétés physico-mécaniques et chimiques, ce qui constitue une barrière à l'accessibilité de la pyrite.

Pour remédier à la situation, il a été question dans cette étude d'élaborer un essai de gonflement pouvant caractériser les matériaux granulaires potentiellement gonflants et, de ce fait, d'utiliser les granulats d'une façon rationnelle. Cet essai faisant l'objet du chapitre suivant permettra donc de trancher sur l'utilisation des granulats se trouvant dans la zone grise, où seuls les essais physico-chimiques et mécaniques ne suffisent pas pour juger ces matériaux.

6 DÉTERMINATION DU POTENTIEL EXPANSIF DES CONCASSÉS

Après la discussion sur les mécanismes de réaction et sur les caractéristiques des granulats pyriteux, voici un examen de la phase expérimentale proprement dite. Très peu d'essais fiables ont été effectués pour vérifier le gonflement des remblais granulaires. DAVID LEWIN (Engineering News Records, 1960) et LUTERNEGGER et coll. (1978) ont tenté de quantifier le soulèvement en simulant la croissance de gypse artificiel dans un shale. En raison des problèmes techniques, la force de cristallisation du gypse s'est limitée à 28,1 kPa, pression jugée nettement insuffisante pour la déformation de structures bétonnées.

Les essais d'expansion réalisés par CÔTÉ (1990) sur un shale gonflant ont montré jusqu'à 0,84 % d'expansion après 810 jours. En même temps, des essais visant à mesurer les forces exercées par la cristallisation de gypse ont révélé des contraintes allant jusqu'à 2,56 MPa. Les résultats de gonflement pour les essais sur pierres concassées obtenus par CÔTÉ (1990) semblent être intéressants, mais le nombre limité des essais effectués ne permet pas de vérifier leur reproductibilité et des difficultés subsistent pour l'évaluation du pourcentage de gonflement total et résiduel. Un autre inconvénient est que les essais proposés ne tiennent pas compte de tous les paramètres susceptibles d'influencer l'oxydation de la pyrite. Il s'agit principalement de l'influence des bactéries ferroxidans, sensées omniprésentes dans un milieu de fondation et tenues pour responsables de la célérité de l'oxydation de la pyrite.

6.1 Objectifs de travail

L'objectif visé par cette étude est de développer un essai d'expansion permettant de déterminer de façon fiable le potentiel de gonflement des matériaux granulaires pyriteux dans les conditions simulant les conditions réelles rencontrées pour un remblai de fondation en contact avec une dalle chauffée.

L'originalité de cet essai réside dans l'utilisation d'un dispositif simple normalisé, en l'occurrence le CBR, ainsi que dans le conditionnement de l'échantillon (humidité et température) et dans

l'introduction de populations bactériennes omniprésentes dans la nature en guise de catalyseur de la réaction.

Afin de rendre compte du rôle de chaque paramètre en vue d'accélérer le processus d'oxydation de la pyrite, l'essai a été mené dans les conditions environnementales les plus défavorables à la stabilité des sulfures, à savoir l'influence de la température, de l'humidité, du degré de saturation, du degré de compactage, de la nature de l'eau simulant la nappe ainsi que de l'ensemencement bactériologique.

6.2 Hypothèses de travail

En somme, pour les essais d'expansion pratiqués dans les moules, l'hypothèse a été émise que les conditions d'humidité, la température et l'introduction de la population bactérienne accélèrent le processus d'oxydation de la pyrite. Il a été tenu pour acquis qu'il y aurait une altération des granulats pyriteux par oxydation de la pyrite suivie de la cristallisation de gypse secondaire ce qui provoquerait une augmentation de volume et de la sulfatation de la dalle de béton pouvant générer un gonflement additionnel. Pour les granulats contenant des minéraux argileux, le gonflement du matériau est dû simultanément à l'adsorption d'eau et à la cristallisation du gypse.

Les moules en plastiques utilisés sont d'une résistance à la déformation nettement supérieure aux contraintes développées par le gonflement pour ne permettre qu'une déformation uniaxiale. Ceci a été vérifié par des essais préliminaires en mettant en œuvre des jauges de déformations en duplicata installées latéralement sur les moules pour lesquels les mêmes conditions expérimentales ont été appliquées.

6.3 Dispositif expérimental

En l'absence d'essai standard, la caractérisation expansive a été réalisée à l'aide d'un ensemble expérimental (figure 6.1) faisant appel à un moule du type CBR (Californian Bearing Ratio).

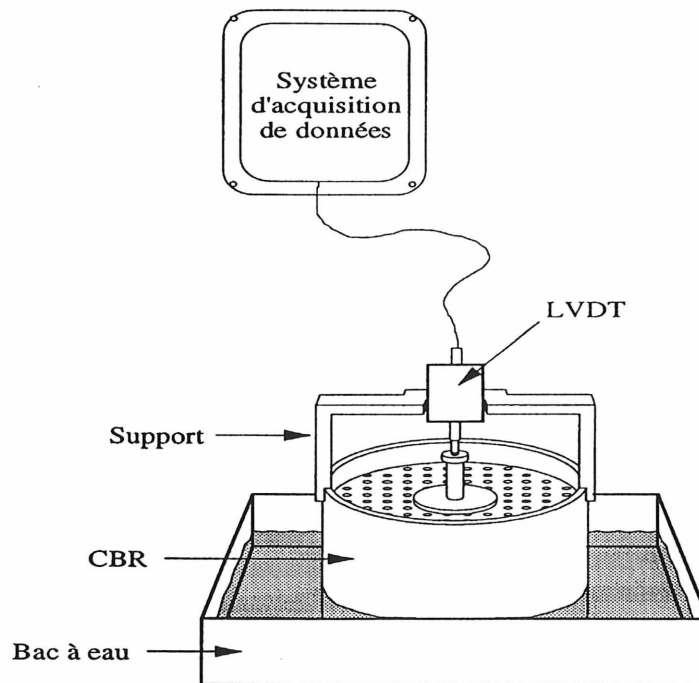


Figure 6.1 Dispositif expérimental pour la mesure d'expansion des granulats pyriteux

Ce dispositif a un double avantage, car avec ce dernier, il est possible d'exécuter l'essai de deux façons différentes :

- à température ambiante, où le moule est chauffé à l'aide d'un cordon chauffant installé au sommet. Dans ce cas, le gradient thermique assure une montée capillaire permettant une oxygénation continue (figure 6.4);
- en chambre humide, où la température et l'humidité sont contrôlées respectivement à 38°C et 100 % (figure 6.3).

Le dispositif expérimental est constitué principalement de 3 éléments :

- Un moule CBR (Californian Bearing Ratio)
- Un bac contenant une culture bactérienne
- Un système d'acquisition de données

6.3.1 Caractéristiques des moules utilisés

Deux sortes de moules ont été mis à contribution (Fig. 6.2). Il s'agit des moules CBR (Californian Bearing Ratio) métalliques et d'une version non standard en PVC rigide dont les dimensions et la capacité sont spécifiées dans la norme BNQ 2501-255-M-86 (section 4.1). Le moule CBR a été retenu pour l'expérimentation à cause de la simplicité de ses composants en plus d'être normalisé selon les normes ASTM et BNQ; par contre le moule en polychlorure de vinyle (PVC) dont les dimensions sont tout à fait conformes au moule métallique vise à éviter la corrosion.

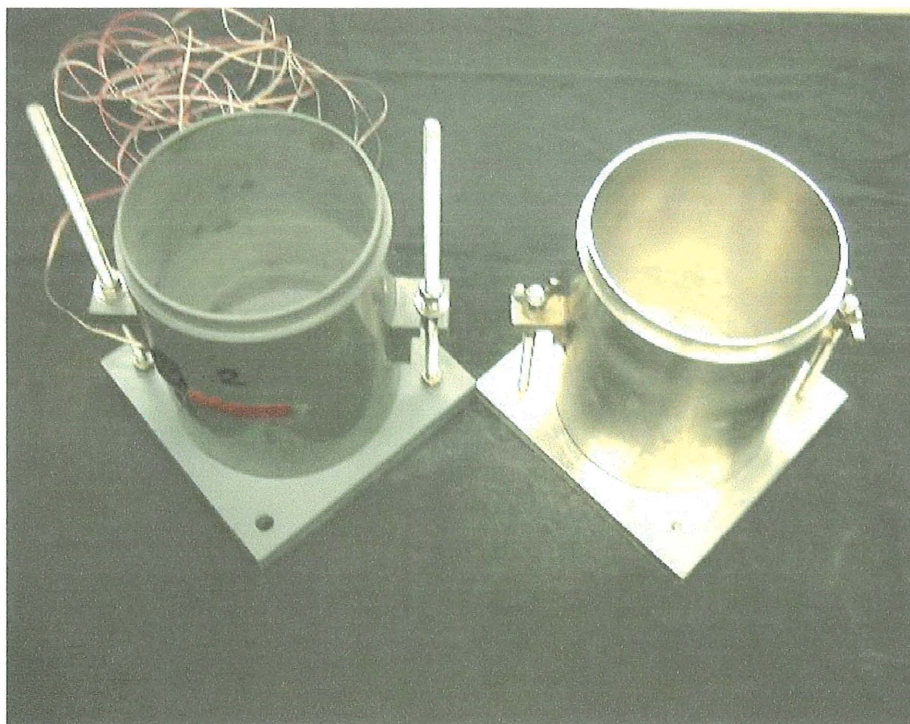


Figure 6.2. Moule CBR en PVC et en métal

Dans le moule, l'échantillon concassé a été compacté à un niveau d'énergie correspondant à l'énergie de l'essai Proctor modifié (BNQ 2501-255 ou ASTM C-12985). Le choix d'une telle énergie de compactage est de mener l'essai dans les conditions de compactage les plus critiques. Le moule CBR est placé dans une cuvette remplie d'eau jusqu'à la base du moule et contenant une culture bactérienne (*Thiobacillus Ferrooxidans* et *Thioparus*) pour permettre la diffusion de la phase liquide vers les solides par capillarité. Une plaque perforée est installée sur l'échantillon afin d'assurer l'évaporation de l'eau. Dans le but de simuler une dalle, une charge correspondant à une contrainte de 2,5 KPa est rajoutée sur l'ensemble.

En TAC¹, le moule est entouré à son sommet par un cordon chauffant, créant ainsi un gradient thermique entre la base du moule et sa partie supérieure. L'objectif visé est de simuler une dalle chauffée reposant sur un remblai. Le gradient thermique ainsi créé accentue la montée de l'humidité par capillarité.

L'utilisation d'un moule plastique usiné à l'Université de Sherbrooke a trois principaux avantages. Il est moins cher compte tenu de la nature des matériaux, permet facilement de mesurer l'expansion tout comme le moule en stainless mais résiste bien en milieu agressif. Le mode opératoire de la norme proposée sera donné dans l'annexe B du présent mémoire.

6.3.2 Un bac contenant de l'eau déionisée

Pour reconstituer le milieu, on a utilisé un bac contenant de l'eau déionisée à laquelle est rajouté un volume de 125 ml de culture bactérienne essentiellement *Thiobacillus Ferrooxidans* et *Thioparus*. Ces populations bactériennes sont omniprésentes dans la nature et elles agissent comme catalyseur de la réaction. La présence des bactéries provoque une multiplication de la vitesse de la réaction d'un facteur estimé, selon les données de littérature, à 10^6 et engendre, par conséquent, un abaissement de l'énergie d'activation. L'eau déionisée dans le bac a une hauteur de plus ou moins 2 cm et un pH proche de celui de l'eau de pluie. La nappe constitue une source d'humidité, paramètres entre autres indispensables pour l'oxydation de la pyrite.

¹ Température ambiante chauffée

La culture bactérienne a été réalisée à partir de résidus miniers récupérés à 20 cm dans le sol dans un ancien parc d'entreposage situé en Estrie. Une quantité de 2,5 g de résidu est mélangée à 150 ml d'eau déionisée dans un Erlenmeyer de 500 ml contenant 1% de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ et 3 g/l de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Les suspensions de résidus ont été ensuite incubées à 175 rpm sur un agitateur rotatif (New Brunswick Scientific Co.) à $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Le pH est ajusté à $3,5 \pm 0,1$ avec H_2SO_4 , puis il a été mesuré à intervalles réguliers en même temps que le potentiel d'oxydo-reduction (POR) durant environ trois semaines. Le suivi est réalisé jusqu'à ce que le POR atteigne 500 mV. Cette augmentation du POR due à l'oxydation du Fe^{2+} en Fe^{3+} est un indicateur de la croissance bactérienne. L'accroissement du potentiel redox est toujours accompagné par une baisse du pH.

6.3.3 Un système d'acquisition de données

Un potentiomètre de type LVDT relié à un système d'acquisition permet de mesurer les déplacements verticaux et la variation de la température (figure 6.1). Toutefois, il existe d'autres possibilités de prises de mesures faciles à utiliser et qui peuvent être accessibles. Il s'agit par exemple d'un LVDT de type fissuro-Logger sollicité surtout dans les conditions ambiantes et qui peut enregistrer le déplacement vertical et la température d'une façon continue avec une autonomie d'environ 9 mois. Dans les milieux non agressifs, on peut aussi monter des cadrans-lecteurs ou comparateurs de déplacements sur les moules et prendre des mesures à un intervalle de temps donné.

6.3.4 Essai d'expansion en chambre humide

L'ensemble expérimental est installé dans une chambre maintenue à $38^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ en présence de 100% d'humidité afin d'accroître le processus d'oxydation de la pyrite et, par conséquent, le gonflement (Fig.6.3). Sous ces conditions, l'activité bactérienne, essentiellement celle des *Thiobacillus Ferrooxidans*, est maximale. En chambre humide, le dispositif d'alimentation en eau est exclu et le niveau d'eau dans la cuvette est assuré par la condensation des vapeurs d'eau. L'expérience a montré que le volume d'eau accumulé dans la chambre ne dépasse guère la base du moule. Avec cette conception, l'ensemble des conditions réunissant les paramètres affectant la stabilité de la pyrite permet de soumettre les granulats au test le plus défavorable.



Figure 6.3 Essais de gonflement en chambre humide

6.3.5 Essai d'expansion à température ambiante

Pour l'essai à 21°C, l'ensemble expérimental est connecté à une alimentation en eau permettant de maintenir le niveau d'eau dans la cuvette juste à la base du moule CBR pour éviter un haut degré de saturation dans l'échantillon, ce qui éliminera la création de barrière à oxygène (figure 6.4). La migration d'humidité par capillarité a permis d'altérer les granulats, favorisant par conséquent, l'oxydation de la pyrite.



Figure 6.1 Essais de gonflement à température ambiante (21°C)

La fiabilité et la reproductibilité des résultats obtenus à l'aide de ce dispositif expérimental a permis l'élaboration d'une norme provisoire désignée de *EGUS*⁴. Celle-ci décrit de façon détaillée la procédure à mettre en œuvre pour évaluer le potentiel de gonflement des matériaux granulaires pyriteux destinés pour les remblais de fondation. Le protocole opératoire de cette norme est rapporté dans l'annexe B du présent mémoire.

⁴ Essai de gonflement développé à l'Université de Sherbrooke

7 RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

Ce chapitre sera consacré à la présentation et à la discussion des résultats du potentiel de gonflement des concassés pyriteux en fonction des attentes fixées au départ et des enseignements relatifs à la revue bibliographique. Il sera question de l'influence de l'ensemencement bactériologique, de la température et le tout sera ponctué par une comparaison réactionnelle des concassés retenus dans le cadre de cette étude.

7.1 Mesures de gonflement et Interprétation

Pour les essais de gonflement, deux séries d'échantillons ont été utilisées. Le premier type concerne les shales pyriteux gonflants P. Dans cette catégorie, trois échantillons ont été expérimentés, dont un appartient à une tranche granulométrique de 0,08-5 mm (P-5), les deux autres (P-20) étant constitués de matériaux passant le tamis de 20 mm. Le second type est représenté par six granulats de référence (A, B, C, D, E, F) fournis par le comité technique chargé d'étudier la problématique de la pyrite. Les concassés désignés par B, D, E, et ME sont des calcaires. Le concassé F est une dolomie argileuse tandis que le concassé A est un shale et le concassé C est une cornéenne¹.

7.1.1 Influence des bactéries et de la température sur la réactivité

En parallèle avec cette investigation, un intérêt a été porté sur le rôle des bactéries tels que les *Thiobacillus* sur la réactivité. Afin de vérifier l'influence de ces bactéries sur l'oxydation de la pyrite, deux échantillons témoins constitués d'un shale (P) et d'un calcaire (ME) ont été expérimentés sans ensemencement bactériologique en chambre humide (température de 38°C; humidité de 100%). Après plus de trois mois d'essai, aucune variation significative dans le processus n'est décelée (Fig. 7.1). Or, après cette période, les mêmes échantillons P et ME, mais ensemencés par des bactéries, avaient déjà enregistré des expansions respectives de 0,6 et de 0,075 % (Fig. 7.1 et fig. 7.2). Ceci montre combien l'activité bactériologique est un facteur

¹ shale qui a subi un métamorphisme de contact intense

important dans le processus d'oxydation de la pyrite. Cependant, comme les essais sont toujours en cours dont les résultats sont donnés uniquement à environ 130 jours (figure 7.1), un amorçage de l'activité bactérienne peut avoir lieu au delà de cette période.

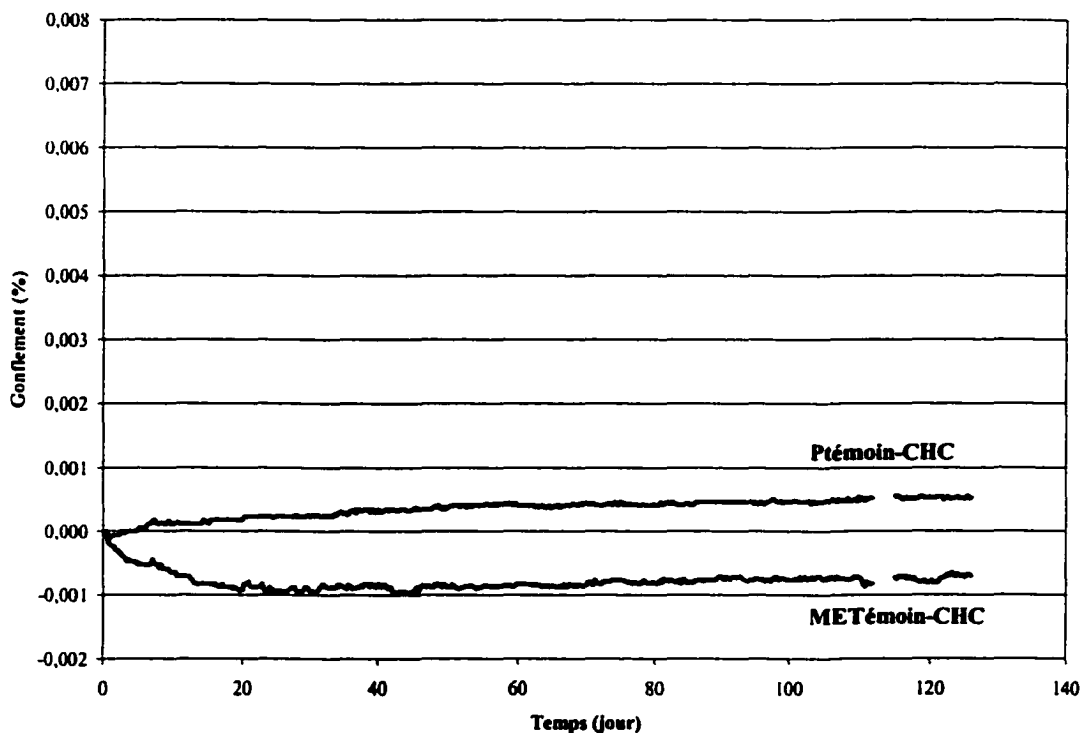


Figure 7.1 Courbes témoins sans l'effet bactériologique

Afin de vérifier l'effet de la température sur la réactivité des granulats, deux échantillons du shale P constitués de matériaux passants à 20 mm ont été expérimentés dans deux milieux différents. Le choix de ces matériaux est justifié par le fait que des essais préliminaires pour la mise au point du dispositif expérimental ont pu mettre en évidence leur très grande réactivité expansive. Compactés dans un moule CBR (*Californian Bearing Ratio*) avec une énergie Proctor modifiée, deux concassés désignés par P-20-CHC et P-20-TAC ont été expérimentés, respectivement à température ambiante (21°C) et humidité réduite (40 %) et à haute température (38°C) avec une humidité maximale (100 %) en présence d'une culture bactérienne.

Les conditions expérimentales appliquées à ces essais et les résultats expérimentaux qui en découlent sont montrés respectivement dans le tableau 7.1 et la figure 7.2.

TABLEAU 7.1 CONDITIONS EXPÉRIMENTALES APPLIQUÉES AUX ÉCHANTILLONS P-20 ET P-5

Échantillon Paramètre	Shale (P-20-CHC)	Shale (P-20-TAC)	Shale (P-5-TAC)
Granulométrie (mm)	0-20	0-20	0,08-5
Température (°C)	38	21	21
Humidité (%)	100	40	40
Hauteur initiale de l'échantillon (mm)	116	116	116
Masse volumique sèche $\rho_d, \text{g/cm}^3$	2,27	2,27	-
Teneur en eau w, %	6,4	6,4	-

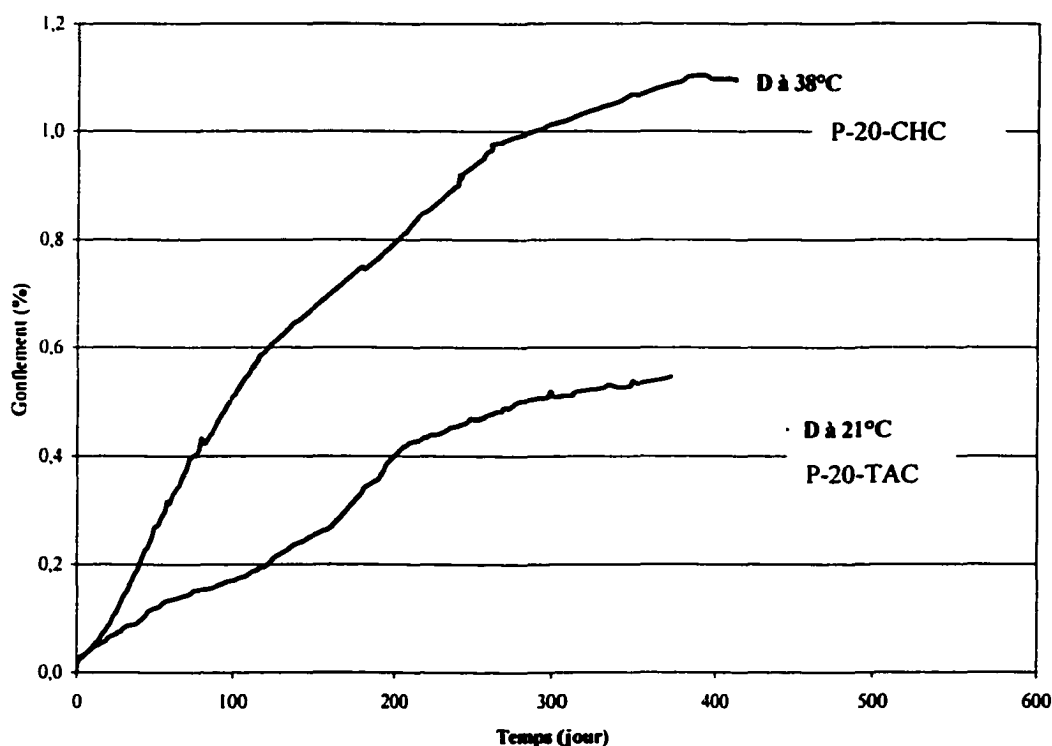


Figure 7.2 Évolution expansive des concassés P-20-CHC et P-20-TAC

À l'analyse de l'évolution expansive reportée à la figure 7.2, il apparaît un gonflement progressif et régulier pour les deux shales considérés et surtout très prononcé au début de l'essai. Cette phase correspond essentiellement à la formation du gypse entraînant une augmentation rapide de volume dans les échantillons. La vitesse d'expansion est plus accrue pour l'échantillon soumis à 38⁰C que celui à 21⁰C. Après 120 jours d'expérimentation, les concassés P-20-CHC et P-20-TAC affichent respectivement une expansion de 0,6 et 0,2 %, ce qui constitue un rapport de 3. Au-delà de cette période, la célérité expansive pour les deux courbes s'amoindrit progressivement, exprimée par un fléchissement de la pente amenant le rapport d'expansion à 2 après 300 jours d'essai. Ce phénomène peut être expliqué par une diminution des sulfures accessibles en surface mais aussi par la formation d'un dépôt de gypse masquant ainsi les sites actifs [BALLIVY et coll., 1997, BELLALLOUI et coll., 1999, DRON et coll., 1989]. L'enrobage des sulfures contenus dans les granulats par le gypse formé constitue donc une couche protectrice qui atténue la diffusion de l'oxygène et de l'humidité vers les sulfures.

Après 300 jours de test, une certaine stabilisation apparaît avec une réactivité environ 2 fois plus élevée pour l'échantillon maintenu à 38°C par rapport à celui à 21°C. Cette observation rallie parfaitement la loi d'Arrhenius stipulant que l'augmentation de la température à chaque 10°C dans un régime cinétique entraîne une augmentation de la vitesse de la réaction de 2 à 3 fois. Pour cette raison, la suite des essais de gonflement a été entreprise et réalisée à 38°C et 100 % d'humidité en présence d'une culture bactérienne afin de réduire expérimentalement la durée de l'essai.

7.1.2 Influence de la surface spécifique sur la réactivité

Le graphique 7.3 ci-dessous met en évidence l'influence de l'humidité et de la surface spécifique sur la réactivité de la pyrite en utilisant des matériaux de même nature, mais avec des granulométries différentes, soit les fractions 0,08-5 mm et 0-20 mm.

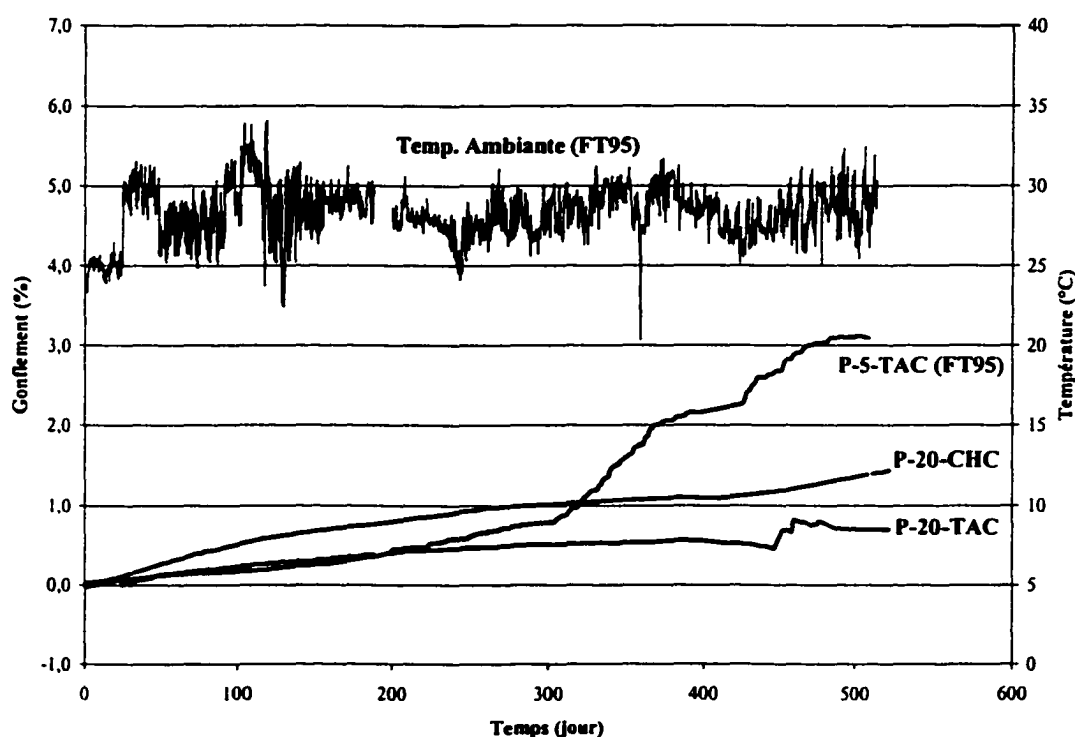


Figure 7.3 Évolution expansive des concassés P-5-TAC, P-20-TAC et P-20-CHC

Sur le graphique 7.3 sont montrées trois courbes de gonflement des concassés P-20-CHC², P-20-TAC³ et P-5-TAC⁴ ainsi que la courbe de variation de la température à la partie supérieure du moule contenant le concassé P-5-TAC. Cette dernière courbe de gonflement a été évaluée à l'aide d'un fissuromètre de type Fissuro-logger. On constate que le concassé P-5 a accusé au début des essais un certain retard d'expansion comparativement aux deux autres concassés P-20, ce qui est tout à fait contraire au comportement attendu. Cette particularité est due vraisemblablement à la saturation de l'échantillon au début de l'essai. En effet, une quantité importante d'eau (eau surmontant légèrement la base du moule) avait été mise dans le bac, ce qui aurait saturé l'échantillon P-5, empêchant, par conséquent, l'oxydation de la pyrite. Après avoir ajusté le niveau d'eau dans le bac jusqu'à la base du moule, il apparaît une reprise de l'expansion avec une vitesse plus accrue et une réduction non négligeable de la succion. À 410 jours d'essai, les concassés P-20-CHC, P-20-TAC et P-5-TAC ont montré des expansions respectives de 1,2, 0,5 et 2,2 % correspondant respectivement à 1,4, 0,6 et 2,6 mm pour une hauteur initiale de l'échantillon de 116 mm. Cette différence de réactivité constatée entre les concassés P-20 et P-5 est directement liée à la surface spécifique ou au degré d'exposition des sulfures contenus dans les matériaux qui aurait favorisé l'expansion pour le cas du concassé P-5.

Pendant la période d'essai se situant entre 410 et 500 jours, la courbe de gonflement de l'échantillon P-20-TAC est caractérisée par des variations non uniformes d'expansion. Les mesures prises pendant cette période ne sont pas conformes à cause des vibrations engendrées par des travaux qui ont été effectués à proximité de l'emplacement du moule.

La courbe de variation de la température à la partie supérieure du moule montre que sur une période de 400 jours d'essai, la température moyenne mesurée au moyen du LVDT FT-95 est de 27°C. Le gradient thermique ainsi créé entre le haut et la base du moule est de 6°C.

² Passant 20 mm en chambre humide

³ Passant 20 mm à température ambiante

⁴ Passant 5 mm à température ambiante

7.1.3 Concassés A, B, C, D, E, F, ME et P

Afin d'accélérer la cinétique des réactions, sept échantillons de granulométrie comprise entre 0-20 mm ont été expérimentés dans la chambre humide (température de 38°C; humidité de 100%) et leurs graphiques sont montrés dans la figure 7.4.

Les fractions 0,08-5 mm n'ont pas été retenues dans la suite du travail dans le but d'éviter tout risque de succion pouvant entraîner un haut degré de saturation caractéristique d'une barrière à oxygène. Néanmoins, de telles plages granulométriques méritent une attention particulière puisqu'elle permettent un contact favorable à l'oxydation. Cependant une connaissance plus approfondie du contrôle du degré de saturation pour ce type de matériau pourrait être d'un apport bénéfique pour accélérer le processus. À la figure 7.5 est montrée l'évolution expansive du calcaire ME.

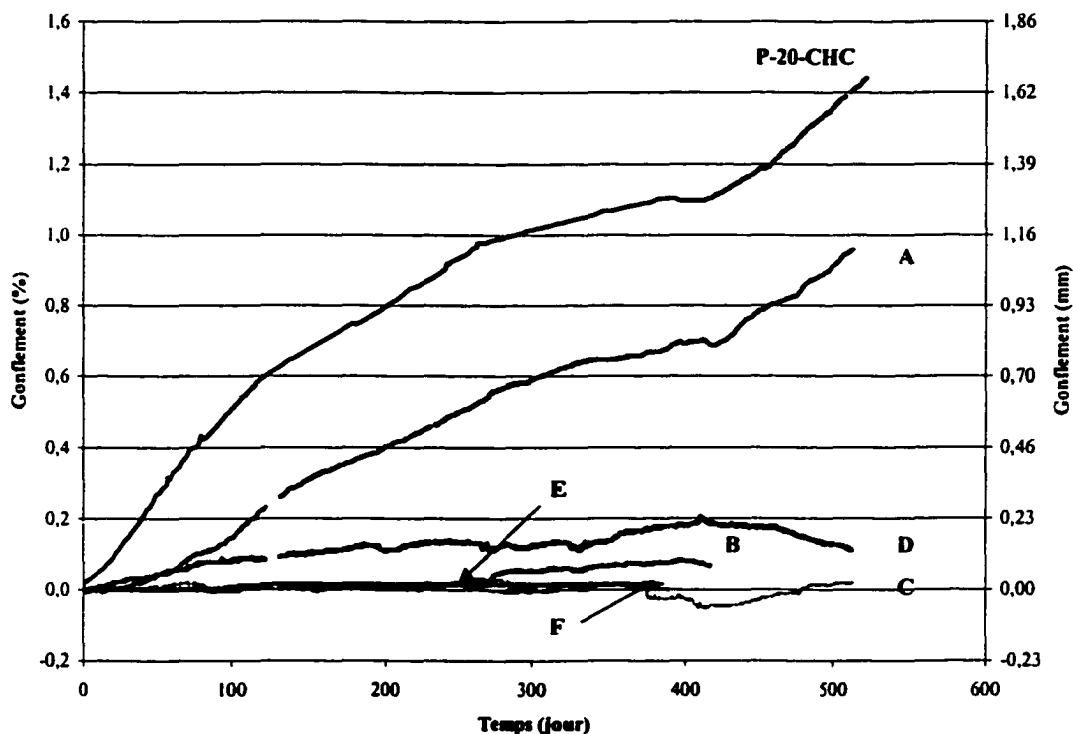


Figure 7.4 Évolution expansive des concassés A, B, C, D, E, F et P (CHC⁵)

⁵ Chambre humide

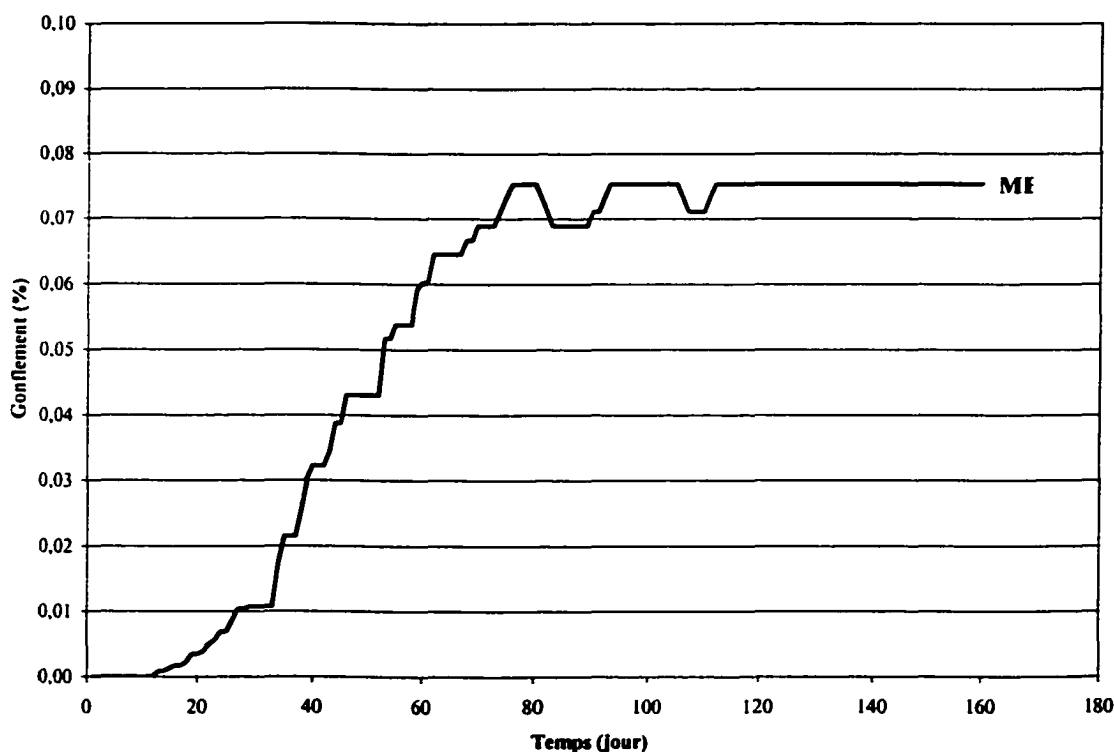


Figure 7.5 Évolution expansive du concassé ME (CHC)

À l'analyse des courbes de la figure 7.4, trois comportements réactionnels peuvent être dégagés. La première catégorie concerne la cornéenne C et la dolomie F. La seconde catégorie rassemble les échantillons ayant réagi tardivement et dont les expansions n'excèdent pas 0,1 %. Il s'agit des calcaires E, B et D. La troisième série incarne les échantillons manifestant un amorçage du gonflement dès le début de l'essai (A, P) suivi par une régularité dans la réactivité.

Hormis la cornéenne C, la première et la deuxième catégorie d'échantillons sont majoritairement constituées de calcaires et sont caractérisées par des propriétés physico-mécaniques performantes rendant la pyrite présente dans les granulats inaccessible aux réactifs. Les concassés de la troisième catégorie, essentiellement des shales, sont caractérisés par de faibles résistances mécaniques, ce qui favorise l'accessibilité des réactifs à la pyrite et aussi une plus grande proportion de pyrite amorphe (framboïdale).

Le calcaire argileux D affiche un faible gonflement avec une certaine stabilité à 300 jours. Ce faible gonflement observé pour le concassé D correspond à une phase de saturation en eau des silico-aluminates contenus dans les granulats et ce processus est réversible. Cette suggestion a été vérifiée par l'adoption de cycles mouillage-séchage où le degré expansif a été réduit de façon considérable avec un pourcentage situé autour de 60 %. Un comportement similaire est relevé pour le calcaire argileux ME dont l'évolution est reportée séparément à la figure 7.5. Pour atténuer voire annihiler l'effet attribué aux silico-aluminates, l'utilisation de la pierre nette (5-20 mm) pourrait s'avérer efficace surtout pour les régions où seul ce type de granulats est disponible.

Jusqu'à 370 jours d'essai, la cornéenne C manifeste une certaine stabilité malgré sa teneur en soufre équivalente à 0,70 %. La pyrrhotite présente serait majoritairement localisée à l'intérieur des granulats, donc en grande partie inaccessible aux réactifs. Ce comportement est étayé par les propriétés physiques et mécaniques développées par ses granulats en fonction de leur pouvoir d'adsorption et de leur résistance à l'attrition et à l'abrasion. Cependant, les résultats obtenus sur le potentiel générateur sulfatique et pour lequel apparaissent des pH relativement bas laissent penser que les sulfates générés ne contribuent pas ou contribuent peu au gonflement. Par contre, leur action se résume par une interaction chimique avec les aluminates du béton.

Jusqu'à 250 jours, l'expansion du calcaire B est presque nulle et à 400 jours d'essai, elle atteint 0,09 %. Ce retard est dû à l'inaccessibilité de la pyrite, car cette dernière se trouve profondément ancrée à l'intérieur des granulats dont les propriétés physico-mécaniques sont performantes.

Sur la figure 7.4, les courbes d'expansion des shales P et A montrent un gonflement régulier et très accentué, surtout pour le shale P et à un degré moindre pour A. Cette différence dans la réactivité est attribuée à la teneur importante en soufre dans l'échantillon P ($S=1,14\%$), valeur plus élevée que dans le cas de A ($S=0,58\%$). En plus, le shale P se distingue par des résultats moins performants en attrition, en abrasion et en adsorption d'eau; caractéristiques parfaitement corroborées par le comportement de résistance au gel-dégel comme l'attestent les résultats reportés dans le tableau 7.3. Ces deux shales se caractérisent par de faibles propriétés mécaniques et physiques, surtout après compactage, où une variation granulométrique non négligeable est observée. Par conséquent,

l'exposition de la pyrite aux réactifs (humidité, oxygène) et aux populations bactériennes est très favorable.

À part les shales A et P, l'ensemble des concassés présente une expansion inférieure à 0,2 % après 500 jours de réactivité. Dans le contexte actuel et vu la problématique des remblais de fondation, un seuil d'acceptabilité des concassés devrait être émis à l'issue de cette étude. Cependant, émettre un seuil de tolérance serait prématuré avant les tests de réactivité après l'essai de gonflement. Toutefois, admettre 0,1% comme critère de sélection pénaliserait uniquement le calcaire D.

7.1.4 Cinétique expansive des shales A et P

Afin de visualiser l'évolution expansive des concassés les plus réactifs dans un contexte cinétique, une représentation par période réactionnelle est adoptée pour les shales reconnus comme étant très réactifs. Les isothermes de gonflement de la figure 7.6 montrent que l'évolution expansive pour les shales A et P se fait par périodes réactionnelles conditionnées, entre autres, par le degré d'exposition des sulfures. Aux différents mécanismes s'opérant au sein des concassés correspondent des variations respectives d'expansions illustrées par des fluctuations au niveau de la pente. À titre indicatif, la vitesse pour le shale P est environ deux fois supérieure à celle du shale A, soit $5,17 \cdot 10^{-3}$ contre $2,20 \cdot 10^{-3}$ %/jour respectivement. En supposant que le degré d'exposition est similaire puisque les propriétés physico-mécaniques sont très proches, donc comparables; cette différence dans la réactivité semble suivre les teneurs initiales en soufre dans les deux concassés (1,14 % pour P et 0,58 % pour A); Ce qui milite en faveur de l'hypothèse selon laquelle la réactivité de la pyrite est à caractère isotrope.

La période stationnaire allant de 377 à 416 jours d'essai caractérisée par une vitesse de $0,005 \cdot 10^{-3}$ %/j pour le shale P, correspond à l'enrobage des sulfures contenus dans les granulats par le gypse néoformé, constituant un obstacle atténuant la diffusion de l'oxygène et de l'humidité vers les sulfures. Le même comportement est observé pour le shale A pour lequel la vitesse expansive avoisine $0,064 \cdot 10^{-3}$ %/jour.

Après un état stationnaire observé entre 360 et 400 jours, une certaine reprise est relevée au delà de cette période. Cette accélération tardive déjà observée [BALLIVY et coll., 1997] est attribuée à une reprise de la diffusion des réactifs, à savoir l'oxygène et l'humidité vers les sulfures. Ce mécanisme est une conséquence soit de la solubilisation du gypse enrobant les sulfures, soit de sa fissuration suite à une dessiccation. Le tableau 7.2 montre les vitesses de variations expansives déterminées pour les shales A et P pour différentes périodes réactionnelles.

TABLEAU 7.2 CÉLÉRITÉS EXPANSIVES DES SHALES P ET A

	P		A	
	Période (Jours)	Vitesse (%/jour) 10^{-3}	Période (Jours)	Vitesse (%/jour) 10^{-3}
V1	0-115	5,17	0-148	2,20
V2	115-262	2,59	148-271	1,89
V3	262-377	1,07	271-336	1,40
V4	377-416	0,05	336-388	0,064
V5	416-522	3,24	388-522	2,38

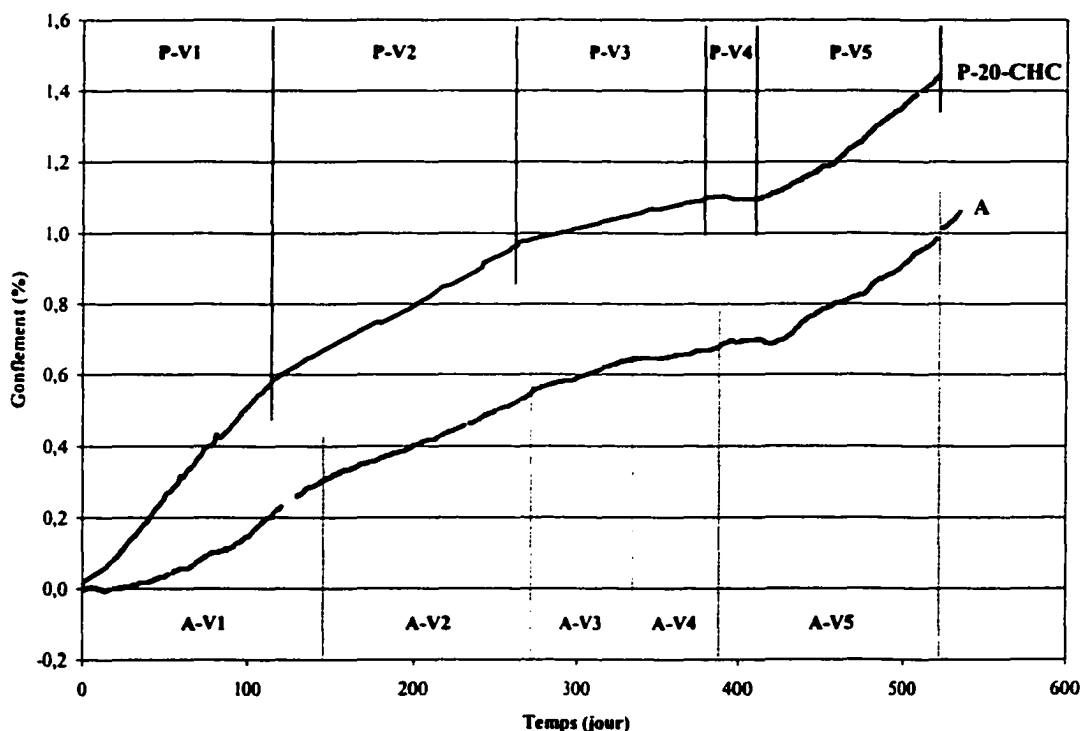


Figure 7.6 Cinétique réactionnelle des shales A et P

L'allure de la pente reflétant le taux de gonflement situé entre environ 400 et 500 jours est pratiquement comparable à la pente du gonflement initial localisé entre 0 et 115 jours de réaction. Ce comportement évolutif est semblable pour les deux shales A et P avec, cependant une différence dans les vitesses. Cette observation amène à suggérer qu'une partie très importante de la pyrite est mobilisée par la réaction, donc soumise aux conditions propices à la réactivité. À la lumière de ces données, la reprise expansive peut aussi provenir si ce n'est en majorité de la désagrégation des granulats suite aux contraintes développées par les cristaux de gypse formés dans les fissures permettant une exposition des particules de sulfures initialement présentes à l'intérieur des granulats. Cette assertion peut être confirmée en partie par la considération des propriétés des shales vis-à-vis de leur résistance à l'humidité simulée par les essais d'adsorption d'eau et surtout par les essais de cristallisation du sulfate de magnésium pouvant être assimilés à la formation du gypse dans les fissures, où une désagrégation quasi-complète des granulats a été observée.

En portant les vitesses reportées au tableau 7.2 relatives à chacune des pentes du comportement du shale P en fonction de la durée moyenne de réaction pour chaque période, il apparaît comme le montre la figure suivante une relation linéaire décroissante entre les paramètres considérés. Comme les principaux réactifs à savoir l'oxygène et l'humidité sont constants, ce comportement régressif est attribué au seul paramètre restant en l'occurrence la pyrite. Autrement dit, la diminution observée est directement liée à la réduction de l'importance de la pyrite accessible aux réactifs suite à sa réaction et son enrobage par le gypse néoformé. Le palier relevé à environ 380 jours traduit la disparité de la pyrite disponible. Au delà, la reprise observée est caractéristique d'un développement des fissures suivi par un éclatement des granulats offrant de nouveaux plans aptes à réagir avec les réactifs. Le shale A se distingue par une allure dont le comportement est pratiquement similaire au shale P avec cependant, des vitesses plus réduites.

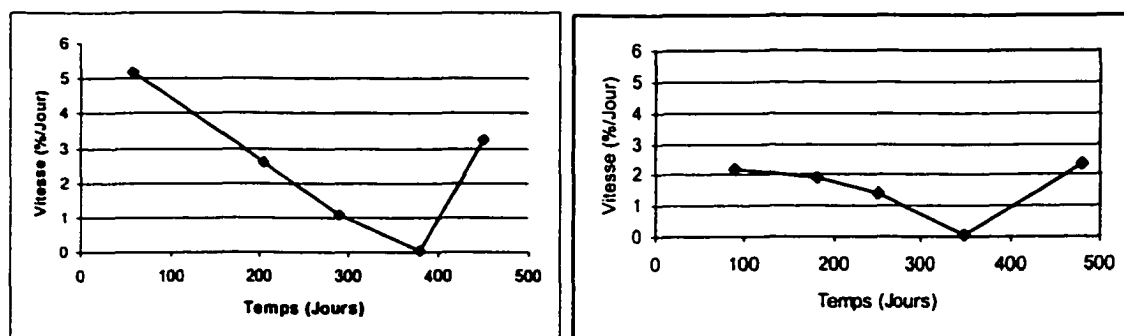


Figure 7.7 Évolution de la vitesse spécifique de la réaction pour les shales P et A

À partir des isothermes reportées sur la figure 7.7, il est possible d'estimer l'énergie d'activation en supposant que le taux expansif est représentatif d'un taux de transformation globale (TTG). Il est établi que la pente en un point de la courbe de l'isotherme est égale à la vitesse spécifique de la réaction à la conversion donnée. En portant le logarithme de la vitesse en fonction de l'inverse de la température pour un même taux de transformation, l'énergie d'activation peut être déterminée. Dans ce cas, le taux de transformation global a été pris à 0,4 %. La figure 7.8 représente la variation du logarithme de la vitesse de la réaction en fonction de $1/T$ pour le shale Utica P. Cette représentation est basée uniquement sur les deux isothermes soit à 21°C et 38°C;

en réalité et pour une meilleure estimation, un minimum de trois isothermes est requis pour un même taux de transformation. La relation d'Arrhénius pour la vitesse est $V = A e^{-E_a/RT}$ avec :

A : Facteur de fréquence ou probabilité de chocs

E_a : Énergie d'activation en Kcal/mol

R : Constante des gaz parfaits = 1,9865 cal.K⁻¹.mole⁻¹

T : Température en degré Kelvin (K)

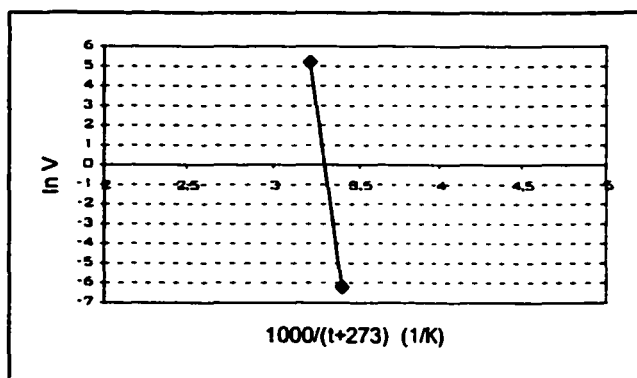


Figure 7.8 Droite d'Arrhénius pour le shale P

L'application de cette relation a permis d'atteindre l'énergie d'activation évaluée à 0,050 Kcal/mol. Cette valeur est caractéristique de la barrière énergétique qu'il faut surmonter pour rentrer en interaction chimique et ce pour le système considéré.

La synthèse des résultats obtenus pour la caractérisation physico-mécaniques et pour l'essai de gonflement est donnée dans le tableau 7.3.

TABLEAU 7.3 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS OBTENUS

Paramètre Échantillon	Soufre %	LA %	MDH %	ADS %	Densité g/cm ³		MgSO ₄ %	Gonfle ment volumique équivalent %	Gonflement mensuel moyen total %
					ρ_d compact ion	ρ_s grains solides			
Shale (A)	0,58	30	90	2,8	2,39	2,80	54	0,7	0,052
Calcaire (B)	0,33	22	25	0,9	2,31	2,72	15	0,1	0,0075
Cornéenne (C)	0,70	12	5	0,4	2,23	2,80	1,0	ϵ^6	ϵ
Calcaire (D)	0,28	23	33	0,9	2,32	2,72	15	0,2	0,015
Calcaire (E)	0,27	26	26	1,0	2,35	2,74	42	ϵ	ϵ
Dolomie (F)	0,42	19	10	0,7	2,43	2,82	2,0	ϵ	ϵ
Calcaire (ME)	0,33	23	17	1,0	2,33	2,73	17	0,075	0,014
Shale (P) d20, CHC	1,14	32	98	3,7	2,28	2,78	62	1,2	0,09
Shale (P) d20, TAC	1,14	32	98	3,7	2,28	2,78	62	0,5	0,04
Shale (P) d5, TAC	1,14		11	4,9	-	2,78	82	3,1	0,23
Valeurs limites selon NQ	-	32-40	26	2,3-3	-		25	-	-

⁶ gonflement très faible

D'après les résultats obtenus des essais, les concassés possédant une certaine réactivité intrinsèque peuvent être classés en trois catégories selon leur aptitude au gonflement et à la sulfatation :

- granulats gonflants (calcaire argileux B, D et ME);
- granulats gonflants avec une action sulfatique (shales A et P);
- granulats non gonflants avec une action sulfatique (cornéenne C).

Sans omettre l'influence des propriétés mécaniques sur le potentiel de gonflement, cette classification est basée essentiellement sur la différence du potentiel de génération acide (teneur en soufre total) et sur le potentiel de neutralisation (teneur en carbonates). Autrement dit, lorsque le potentiel de neutralisation est beaucoup plus important que le potentiel de génération acide après oxydation des sulfures, il y a neutralisation presque immédiate induisant la formation du gypse. Dans ce cas, le gonflement dans le remblai est le processus le plus favorable. Dans le cas contraire, à savoir des granulats très pauvres ou exempts de carbonates, par exemple la cornéenne C, les sulfates néoformés, avec la montée de la nappe, peuvent migrer vers la partie supérieure et provoquer ainsi une sulfatation de la dalle de béton. Toute une panoplie de réactions chimiques peuvent avoir lieu pour former des produits tels que l'ettringite et la jarosite, entraînant ainsi un vieillissement accéléré et une délamination de la dalle. Les deux processus de gonflement et de sulfatation sont susceptibles de se produire simultanément dans le cas où les carbonates disponibles sont présents avec des teneurs relativement modérées (shales A et P). Le calcaire E et la dolomie F peuvent être utilisés comme matériaux granulaires sous dalle en béton de fondation sans risque de gonflement, ni de sulfatation.

Le schéma suivant (figure 7.9) illustre de façon succincte certaines phases pouvant se former dans un système incluant un remblai de fondation en contact avec une dalle en béton.

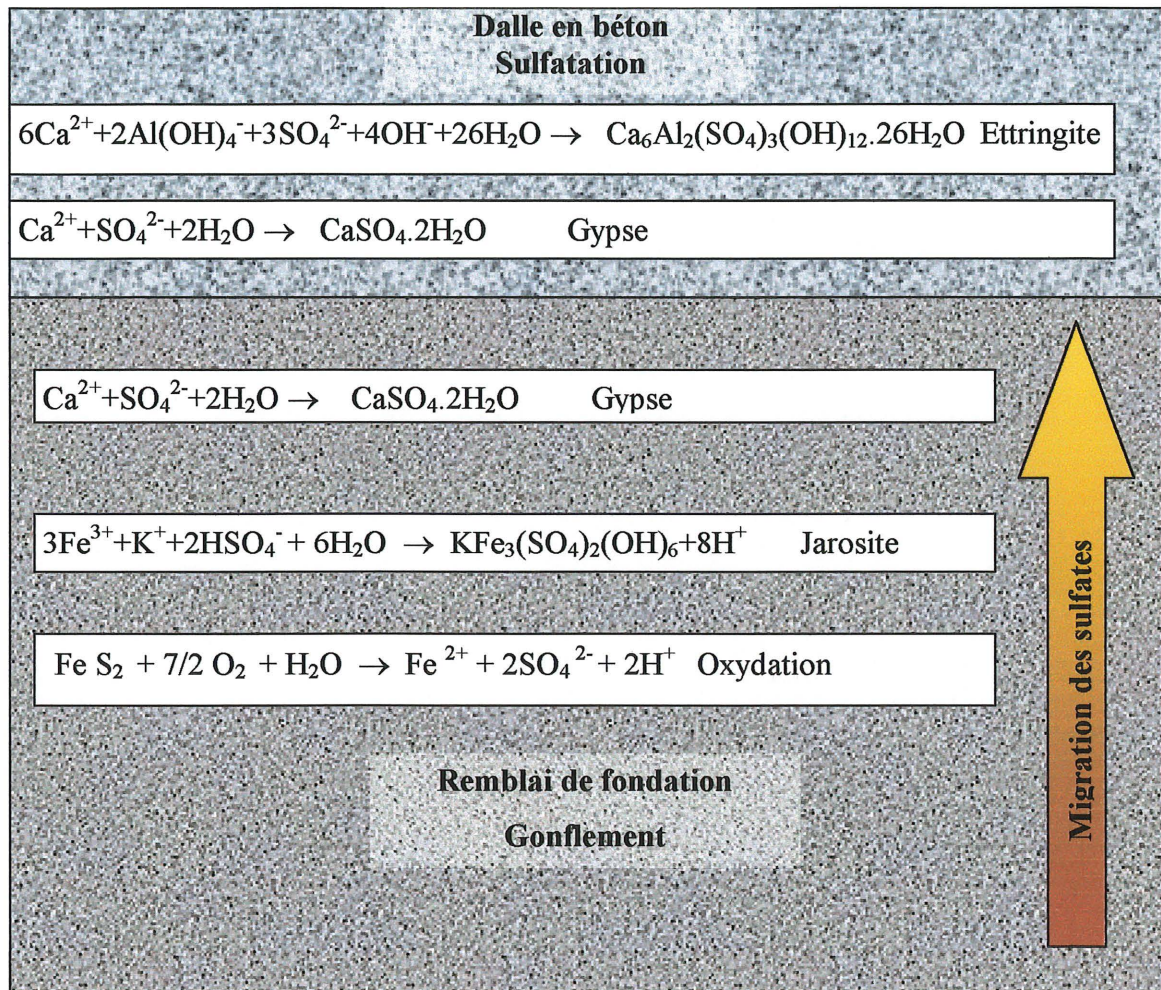


Figure 7.9 Mécanismes de gonflement et de sulfatation de la dalle du béton

Toutefois, ces mécanismes réactionnels sont gouvernés par des paramètres clés régissant les conditions propices au déroulement des différentes réactions mises en jeu. En ce sens, il a été relevé des cas où le même type de granulats peut se comporter de façon différente en manifestant une expansion lorsqu'il est soumis à des paramètres favorables. Par contre si le milieu est défavorable, aucun gonflement n'est déplorable.

De plus, le niveau de la nappe est un facteur non négligeable qui conditionne la prédominance du gonflement vis-à-vis de la sulfatation, des deux phénomènes associés ou vice versa. Autrement dit, après formation et cristallisation du gypse et avec la montée de la nappe, il y a dissolution du

gypse (2 g/l) qui par migration capillaire entraîne une sulfatation de la dalle en béton. La diminution du niveau de la nappe au sein du remblai engendre un dépôt de sulfates accroissant par conséquent le volume interstitiel avec l'apparition d'expansion dans le remblai. En somme, l'ensemble des mécanismes est régi par un équilibre thermodynamique dans lequel interviennent, entre autres, les coefficients d'activité et les indices de saturation, le tout régulé par le niveau de la nappe.

CONCLUSION

En présence des conditions favorables, les sulfures contenus dans les concassés peuvent s'oxyder et induire, après neutralisation de l'acide sulfurique formé, l'apparition de sulfates tenus pour responsables des expansions volumiques au sein des remblais de fondation. À la suite de ces expansions, beaucoup de résidences ont subi des soulèvements de dalles, et dans les cas les plus sévères, ces soulèvements étaient accompagnés de la sulfatation de la dalle de béton ou de répercussions sur les structures remettant en cause la qualité de la structure et donc la valeur marchande de l'immobilier. Afin d'éviter ce genre de problèmes, la présente étude a permis de mettre au point un dispositif expérimental susceptible d'évaluer le potentiel expansif des concassés destinés aux remblais de fondation. La reproductibilité de différents essais a permis de démontrer la validité et la fiabilité d'un tel dispositif. À l'aide de ce dispositif, il est possible de qualifier les granulats sur une échelle complète de leur potentiel expansif évitant par conséquent la pénalité des matériaux intermédiaires dont certains présentent de très forts potentiels de gonflement et d'autres, des potentiels de gonflement négligeables.

L'ensemble des résultats acquis a amené une différenciation de la réactivité de chacun des concassés considérés par des approches chimique, physico-mécanique et expansive. En effet, l'association des diverses techniques de caractérisation conjuguées à l'essai de gonflement a abouti à une classification des granulats réactifs. En outre certains granulats sont dotés de pouvoir expansif et sulfatique très importants, comme les shales désignés par A et P, ils sont automatiquement rejetés et ne peuvent être admis comme concassés de remblais de fondation. Ils sont donc considérés comme des matériaux à risque, car ils ne répondent même pas à la première étape de la procédure CTQ-M100⁷, constituée par l'approche pétrographique. Par contre, la cornéenne C est admissible, mais avec une précaution consistant à utiliser un coupe-vapeur et surtout un ciment résistant aux sulfates. Les calcaires argileux B, D et ME montrent un très faible pouvoir expansif, pouvoir reconnu comme étant en grande partie réversible. Ils peuvent être admis comme pierre nette, ce qui évite, par conséquent tout risque de soulèvement. Une considération similaire peut être adoptée à un degré moindre en ce qui concerne le calcaire B.

⁷ Méthodologie de caractérisation des matériaux granulaires gonflants

Les résultats de cette étude ont montré que les propriétés physico-mécaniques particulièrement l'adsorption, la désagrégation aux sulfates de magnésium ont une grande influence sur l'accessibilité des sulfures. En effet, la pyrite, pour être apte à l'oxydation, doit présenter une surface de contact avec l'eau et l'oxygène. Cette présence se manifeste soit en surface ou dans les fissures des granulats. Par contre, les sulfures enrobés à l'intérieur des solides sont faiblement affectés par les réactions d'oxydation. C'est le cas notamment de la cornéenne C, du calcaire E et de la dolomie F contenant respectivement 0,70, 0,27 et 0,42 % de pyrite mais n'accusant aucun gonflement.

L'ensemble expérimental développé à l'Université de Sherbrooke par le Laboratoire de Mécanique des Roches et de Géologie Appliquée a permis de déterminer le potentiel expansif des granulats provenant de différentes carrières. L'objectif visé est sa normalisation en vue de son exploitation par les laboratoires d'expertises et éventuellement par les producteurs de granulats. Cette nouvelle technique aura une retombée économique certaine en permettant l'approvisionnement de matériaux granulaires en toute sécurité dans les régions touchées par la problématique de la pyrite.

RECOMMANDATIONS

Le dispositif expérimental développé par le laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée de l'Université de Sherbrooke constitue à l'heure actuelle une avenue qui permet de mesurer l'expansion des granulats pyriteux d'une façon fiable. Toutefois, pour avoir une plus grande représentativité, il est nécessaire de valider l'essai à plus grande échelle en utilisant un cube de volume plus important. D'autres recherches visant à raccourcir le délai de l'essai sont envisageables afin de mieux satisfaire les besoins pressants du moment.

Comme il a été constaté sur la courbe de gonflement de l'échantillon P-5-TAC (fig. 7.3), le degré de saturation en eau était le facteur principal du ralentissement de gonflement au début de l'essai accentué par la granulométrie des matériaux. Pour cela, il est recommandé de procéder à des investigations cinétiques par l'adoption de différentes plages granulométriques au moyen du moule CBR à 38°C et 100 % d'humidité, et en tenant compte des degrés de saturation et de compactage de l'échantillon .

Pour avoir une idée de l'altération après l'essai de gonflement, il paraît indispensable de caractériser les échantillons après le test d'expansion. Ce volet n'a pas été présenté dans le cadre de ce mémoire étant donné que les essais expansifs se poursuivent.

Afin d'éviter une sulfatation de la dalle de béton, la considération d'un coupe-vapeur et l'utilisation d'un ciment résistant aux sulfates sont fortement recommandés.

Enfin, des mesures préventives sont nécessaires pour arrêter le processus de gonflement. Des essais d'injection appropriés peuvent être entrepris pour stopper l'expansion en plein essor à condition que le remblai soit suffisamment perméable. Une attention particulière doit être portée sur le dosage et la qualité du liant à utiliser, car selon une étude faite par BARYLA et coll.(2000), une incompatibilité peut exister entre le fort dosage en liant et la teneur en ions sulfate et soufre contenus dans les granulats.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AÏTCIN, P.-C., JOLICOEUR, C. MERCIER, M. (1992) *Technologie des granulats*, Québec (Sainte-Foy), 2^e édition, Le Griffon d'argile, 386 p.

ALPERS, C.N. (septembre 1991) *Évolution géochimique des eaux de drainage minier très acides. Jusqu'où peut-on abaisser le pH ?*, Deuxième Conférence Internationale sur la Réduction des eaux de Drainage Acides, Résumé des Conférences, Montréal, 63 p.

ASSOCIATION DES CONSOMMATEURS POUR LA QUALITÉ DANS LA CONSTRUCTION (octobre 1999) *LA PYRITE ET VOTRE MAISON*, Mieux comprendre le phénomène du gonflement des remblais sous dalle, 48 p.

ASTM (1996) *Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens*, D2938-95.

ASTM (1996) *Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens in Uniaxial Compression*, D3148-93.

BALLIVY, G et BELLALLOUI, A. (mai 1997) *Mise en évidence de divers mécanismes de gonflement et mise en garde pour la conception des fondations*, Colloque AEG-RPPG, Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement, Laval, Québec, 11 p.

BALLIVY, G and BELLALLOUI, A. (december 1999) *New Swelling Test to Characterize the Expansive Potential of Pyritic Rock fill*, Geotechnical News, Canada, vol. 17, n° 4, p. 53-55.

BARYLA, J.-M., CHENAIS, V., GAVOIS, L., HAVARD, H. (janvier-février 2000) *Effet de sulfates et sulfures sur des marnes traitées à la chaux et au liant routier sur un chantier autoroutier*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France, Bull. 224, p. 39-48.

BELLALLOUI, A., BALLIVY, G. (décembre 1999) *Problèmes de gonflement de remblais de fondation associés à la pyrite*, Chimiste, p. 20-23.

BELLALLOUI, A., NKURUNZIZA, G. et BALLIVY, G. (octobre 2000) *Gonflement de remblais de fondation : simulation en laboratoire*, 53^e Conférence annuelle de la Société Canadienne de Géotechnique, Montréal, Canada, p. 1293-1301.

BELLALLOUI, A., MOSONI, L., ROUBIN, M., VRINAT, M., LACROIX, M. et BREYSSE, M. (1988) *Préparation de sulfures de structures type pyrite à base de ruthénium $M_xRu_{1-x}S_2$ ($M: Ni, Fe, Cr, Mn$)*, Compte Rendu de l'Académie des Sciences, Paris, vol. 304, Série II, N-19, p. 1163-1168.

BELLALLOUI, A., CHTAINI, A., BALLIVY, G. et NARASIAH, S. (1996) *Stabilisation des résidus miniers acides à l'aide des poussières de four de cimenteries comme source alcaline*, Conférence NEDEM, Rouyn Noranda, vol. 2, p. 217-230.

- BÉRARD, J. (1970) *Black Shale heaving at Ottawa, Canada: Discussion*, Canadian Geotechnical Journal, Canada, vol. 7, p. 113-115.
- BÉRARD, J. (mai 1997) *Des désordres sulfatiques*, Colloque AEG-RPPG, Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement, Laval, Québec, 11 p.
- BÉRARD, J., ROUX, R. et DURAND, M. (1974) *Performance of Concrete Containing a Variety of Black Shale*, Canadian Journal of Civil Engineering, Canada, vol. 2, p. 58-65.
- BERTRAND, J., BALLIVY, B. (1991) *Excavations rocheuses : Évaluation du potentiel à générer des eaux de ruissellement acide par l'oxydation des sulfures*, Première Conférence Canadienne de Géotechnique Environnementale, Montréal, p. 437-443.
- BERTRAND, J. (1991) *Excavations rocheuses : Évaluation du potentiel à générer des eaux de ruissellement acides par l'oxydation des sulfures*, Mémoire de maîtrise en environnement, Faculté des sciences, Université de Sherbrooke, 116 p.
- BÉRUBÉ, M. A., LOCAT, J., GÉLINAS, P., CHAGNON, J. Y., LEFRANÇOIS, P. (1986) *Black Shale Heaving at Sainte -Foy*, Canadian Journal of Earth Sciences, Québec, Canada, vol. 23, p. 1774-1781.
- BÉRUBÉ, M. A. (mai 1997) *Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement : La situation actuelle au Québec*, Colloque AEG-RPPG, Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement, Laval, Québec, 40 p.
- BLANCHETTE, A. (1997) *Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement*, Comptes rendus- Colloque AEG-RPPPG, Évolution technologique dans l'industrie du granulat, Sainte-Foy, Québec, 12 p.
- CABRAL, A., RACINE, I., BURNOTTE, F., LEFEVRE, G. (february 2000) *Diffusion of oxygen through a pulp and paper residue barrier*, Canadian Geotechnical Journal, Canada, vol. 37, p. 201-217.
- CALDWELL, J.A., SMITH, A., et WAGNER, J. (1984) *Heave of Coal Shale Fill*, Canadian Geotechnical Journal, vol. 21, p. 379-383.
- CHTAINI, A., BELLALLOUI, A., BALLIVY, G., NARASIAH, S., LALANCETTE, J. and BILODEAU, C. (1997) *A study of acid mine drainage control by addition of alkaline mill paper waste*, Fourth International Conference on Acid Rock Drainage, Vancouver, vol. 3, p. 1147-1161.
- CLARK, C.S. (1972) *Oxidation of Coal Mine Pyrite*, Journal of the Sanitary Engineering Division, Proceedings Paper 4802 of the American Society of Civil Engineering, vol. 92, n° SA2, p. 127-247.
- COMITÉ TECHNIQUE QUÉBÉCOIS D'ÉTUDES DES PROBLÈMES DE GONFLEMENT ASSOCIÉS À LA PYRITE (avril 1999) *Méthodologie de caractérisation du potentiel de gonflement des matériaux granulaires "Matériaux DB"*, Document CTQ-M100, version 1.1, 11 p.

COMITÉ TECHNIQUE QUÉBÉCOIS D'ÉTUDES DES PROBLÈMES DE GONFLEMENT ASSOCIÉS À LA PYRITE (juillet 1999) *Protocole d'expertise sur bâtiments résidentiels existants*, Document CTQ-M200, version 1.1, 44 p.

CÔTÉ, F. (1990) *Expansion de shales pyriteux*, Mémoire de Maîtrise en sciences appliquées, Département de génie minéral, École Polytechnique de Montréal, 177 p.

CÔTÉ, F. (1997) *Mécanisme de gonflement et simulation en laboratoire*, Colloque AEG-RPPG, Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement, Laval, Québec, 18 p.

CÔTÉ, F., BÉRARD, J., et ROUX, R. (1991) *Cas de réactivité et de gonflement de remblais granulaires riches en shale pyriteux*, Collection Environnement et géologie, APPG, Vol. 12, p. 225-246.

CÔTÉ, F. et MENARD, D. (mai 1997) *Histoire de cas, expertise et réfection d'une structure*, Colloque AEG-RPPG, Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement, Laval, Québec, 19 p.

CROCKER, C.R. (août 1962) *Sous-sols des maisons d'habitation*, Conseil National de Recherche du Canada, Digeste de la Construction au Canada, n° 13-F.

DELISLE, C. E., ANDRÉ, P., BOUCHARD, M. A. (1986) *Les précipitations acides et leurs effets potentiels au nord du 55° parallèle du Québec*, Collection Environnement et géologie, v. 2, 280 p.

DELOYE, F.-X. (mai-juin 1989) *Action conjuguée du soufre et des alcalins dans les réactions liant-granulats au sein du béton*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France, Bull. 161, p. 41-49.

DIVET, L. (janvier-fevrier 1996) *Activité sulfatique dans les bétons consécutive à l'oxydation des pyrites contenues dans les granulats*, Synthèse bibliographique, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France, Bull. 201, p. 45-63.

DIVET, L., DAVY, J.-P. (juillet-août 1996) *Étude des risques d'oxydation de la pyrite dans le milieu basique du béton*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France, Bull. 204, p. 97-107.

DRON, R., BRIVOT, F. (mai-juin 1989) *Le gonflement ettringitique*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France, Bull. 161, p. 25-31.

Engineering News Record 1960 *Structures don't Settle in this Shale, but Watch Out for Heave*, vol. 164, p. 46-48.

GILLOTT, J.E., PENNER, E., et EDEN, W.J. (1974) *Microstructure of Billings Shale and Biochemical Alteration Products*, Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, vol. 11(4), p. 480-489.

- GLOBENSKY, Y. (1985) *Géologie des régions de Saint-Jean (partie nord) et de Beloeil*, Gouvernement du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Direction générale de l'exploitation géologique et minérale, 94 p.
- GRATTAN-BELLEW, P.E, and EDEN, W.J. (1975) *Concrete Deterioration and Floor Heave due to Biogeochemical Weathering of Underlying Shale*, Can. Geotech. J., vol. 5, p. 372-378.
- GRATTAN-BELLEW, P.E. and McROSTIE, G. C. (1982) *Evaluation of Heave Prevention Methods for Floor Founded on Shale in the Ottawa Region*, Can. Geotech. J., vol. 19, p. 108-111.
- HAMILTON, J.J. (juin 1977) *Fondations dans les sols sujets à des gonflements ou à des retraits*, Conseil National de Recherche du Canada, Digeste de la Construction au Canada, n° 184-F.
- HOLTZ, R.D., KOVACS, W.D. (1991) *Introduction à la géotechnique*, Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada, 808 p.
- JACQUIER, R., MAURIN, M., LAMATY, G. et SOULIER, J. (1969) *Équilibres en solution*, Collection Dunod Université, Paris, 172 p.
- JAMBOR, J.L. (septembre 1991) *Étude minéralogique de résidus à basse teneur en sulfure, à haute teneur en carbonate et contenant de l'arsenic en provenance de la mine Delnité, Timmins, Ontario*, Deuxième Conférence Internationale sur la Réduction des eaux de Drainage Acides, Résumé des Conférences, Montréal, 62 p.
- JANGDAL, C. E. (1971) *Swelling Shale in the Ostersund Area*, National Swedish Building, Research Report R35, 116 p.
- KADIRI, F. (2000) Thèse de Doctorat en cours, Département de génie civil, Université de Sherbrooke.
- LACROIX, P., CÔTÉ, F. (août 1991) *Soulèvement de dalles sur shale pyriteux et sulfatation des bétons : historique de cas au Québec (Canada)*, Second Canmet/ACI International Conference on Durability of Concrete, Montréal, 25 p.
- LANDESMAN, J., DUCAN, D. W. and WALDEN, C. C. (1966) *Iron Oxydation by Washed Cell Suspensions of the Chemoautotroph, Thiobacillus ferrooxidans*, Can. J. Microbio., vol. 12, p. 25-33.
- LEA, F. M. (1968) *Some Studies on the Performance of Concrete Structures in Sulfate-Bearing Environments*, Symposium on the Performance of Concrete to Sulfate and other Environmental Conditions, imprimé au Canada par University of Toronto Press, p. 56-65.
- LUTENEGGER, A. J., WOLLENHAUPT, N. C., HANDY, R. L. (1978) *Laboratory simulation of Shale Expansion by Induced Gypsum Growth*, Canadian Geotechnical Journal, vol. 16, p. 405-409.

- MALOUF, E. E. and PRATER, J. D. (1961) *Role of Bacteria in the Alteration of Sulfide Minerals*, J. Metals, p. 353-356.
- MEERSSCHE, M. V. et DUPONT, J. F. (1973) *Introduction à la cristallographie et à la chimie structurale*, Édition Vander, 288 p.
- MORGENSTERN, N.R. (1970) *Black Shale Heaving at Ottawa: Discussion*, Canadian Geotechnical Journal, Canada, vol. 7, p. 114-115.
- MORTH, A.H. and SMITH, E.E. (1966) *Kinetics of the Sulfide-to-Sulfate Reaction*, Proceedings, 151st National Meeting, Am. Chem. Soc. Pittsburgh, Pa., Marsh.
- MOURM, J., ROSENQVIST, I. T. (septembre 1959) *Sulfate Attack on Concrete in the Oslo Region*, Journal of the American Concrete Institute, Proceeding, vol. 56, p. 257-264.
- NARITA, E., LAWSON, F., HAN, K. N. (1981) *Solubility of Oxygen in Aqueous Electrolyte Solutions*, Hydrometallurgy, vol. 10, p. 21-37.
- NICHOLSON, V. R., GHILLHMAN W. R., CHERRY A. J. and READON J. E. (1989) *Reduction of Acid Generation in Mine Tailings Through the Use of Moisture-Retaining Cover Layers as Oxygen Barriers*, Canadian Geotechnical Journal, vol. 26, p. 1-8.
- NIELSON, K. K., ROGERS, V. C. and GEE, G. W. (1984) *Diffusion of Radon Through Soils : a Pore Distribution Model*, Soil Science Society of America Journal, vol. 48, p. 482-487.
- NORDSTROM, D. K. (1982) *Aqueous Pyrite Oxidation and Consequent Formation of Secondary Iron Minerals in Acidic Sulphate Weathering*, Soil Science Society of America Journal, Special Publication, vol. 10, p. 37-56.
- Norme de contrôle qualitative des granulats pour la construction routière, *Étude bibliographique*, Ministère des transports du Québec.
- PENNER, E. (1964) *Congélation du sol et soulèvement dus au gel*, Conseil National de Recherche du Canada, Digeste de la Construction au Canada, n° 26-F.
- PENNER, E., GILLOTT, J. E. et EDEN, W. J. (1970) *Investigation of Billings Shale by Mineralogical and Biochemical Methods*, Canadian Geotechnical Journal, vol. 7, p. 333-338.
- PENNER, E., EDEN, W. J., and GILLOT, J. E. (1973) *Floor Heave Due to Biochemical Weathering of Shale*, Proceedings, 8th International Conference on soil Meckanics and fondations Engineering, Moscow, vol. 2, Part 2, Session 4, p. 151-158.
- PENNER, E., EDEN, W. J. and GRATTAN-BELLEW, P. E. (1975) *Expansion of pyritic shales*, National Research Council of Canada, Division of Building Research, Construction Building Digest n° 152, 5 p.

- PUGH, C. E., HOSSNER, L. R., DIXON, J. B. (1984) *Oxidation Rate of Iron Sulfides as Affected by Surface Area, Morphology, Oxygen Concentration and Autotrophic Bacteria*, Soil Science, vol. 137, n° 5, p. 309-314.
- PREST, V.K., KEYSER, J. H. (1982) *Caractéristiques géologiques et géotechniques des dépôts meubles de l'île de Montréal et des environs*, Québec.
- QUIGLEY, R. M and VOGAN, R. W. (1970) *Black shale heaving at Ottawa*, Canadian Geotechnical Journal, Canada, vol. 7, p. 106-115.
- QUIGLEY, R.M , ZAJIC, J.E., McKYES, E., et YOUNG, R.N. (1973) *Oxydation and Heave of Black Shale*, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Proceeding of the American Society of Civil engineering, vol. 99, n° 5MS, p. 417-420.
- QUIRION, M. (1995) *Étude de la structure des granulats concassés par analyse d'images et stéréologie*, Mémoire de maîtrise de l'Université de Sherbrooke, Département de génie civil, Sherbrooke, 170 p.
- ROCHE, M., DESBARRES, J., COLIN, C., JARDY, A. et BAUER, D. (1990) *Chimie des solutions*, collection info chimie, Paris, 358 p.
- SMITH, E. E. et SHUMATE, K.S. (1970) *Sulfide to Sulfate reaction Mechanism*, Ohio State University Research Foundation, Water Pollution Control Research Series, n° 14010 FPS, 115 p.
- STOUT, W. (1935) *Clarion Clay of Vinton County, Ohio*, Journal of the American Ceramic Society, vol. 15, p. 397-406.
- SWENSON, E.G. (1974) *Le béton en milieux sulfatés*, Conseil National de Recherche du Canada, Digeste de la Construction au Canada, n° 136-F.
- TANGUAY, M. (1998) *Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement. Le point sur la situation au Québec*, Colloque AEG-RPPG, Les shales pyriteux et les problèmes de gonflement, Laval, Québec, 12 p.
- TONIAZZO, V. (1998) *Approche des mécanismes d'oxydation de la pyrite par Thiobacillus Ferroxidans grâce à la modélisation morpho-chimique de la surface minérale : rôle fondamental des phases superficielles oxydées*, Thèse de doctorat, Université Henri-Poincaré de Nancy.
- WILKIN, R.T. and BARNES, H.L. (1997) *Formation Processes of Framboïdal Pyrite*, Geochimica and Cosmochimica acta, vol. 61, p. 323-339.
- WILLIAMS, G.P. (1974) *Le drainage autour des bâtiments*, Conseil National de Recherche du Canada, Digeste de la Construction au Canada, n° 156-F.
- WILSON, E. J. (1987) *Pyritic Shale Heave in the Lower Lias at Barry, Glamorgan*, Quarterly Journal of Engineering Geology, London, vol. 20, p. 251-253.

YANFUL, E., et ST-ARNAUD, L. (1990) *Generation and Evolution of Acid Pore Waters at the Waite-Amulet Tailing Site*, Rapport final à CANMET.

ANNEXE A

**DÉFORMATIONS STRUCTURALES DUES AU ROC ARGILEUX DE FONDATION :
CAS DU BURUNDI**

DÉFORMATIONS STRUCTURALES DUES AU ROC ARGILEUX DE FONDATION : CAS DU BURUNDI

A GONFLEMENT DU ROC DE FONDATION

Introduction

En génie civil, le sol subit des cycles de drainage/humidification en raison de l'alternance des saisons sèches et humides, que des modifications de son état de contrainte par application de changements. Ces sollicitations hydro-mécaniques introduisent des variations volumiques importantes.

Les sols sujets au gonflement constituent au Canada comme au Burundi, le risque naturel le plus coûteux pour les bâtiments construits sur des fondations peu profondes. Dans les seules provinces des Prairies, un million de Canadiens ou plus vivent dans des agglomérations construites sur des sols ayant un potentiel d'expansion très élevé [HAMILTON, 1977].

Dans certaines zones où un roc gonflant affleure en surface, des dommages aux bâtiments peuvent survenir à la suite du gonflement du roc. Ce fut le cas au Canada pour certains gros bâtiments dans les régions de Québec, d'Ottawa et de la Rive-sud de Montréal (ACQC¹). Au Burundi, la majorité des dommages subits par les bâtiments est due au mouvement de gonflement-retrait du roc de fondations et plus précisément d'un sous-sol argileux. Ce risque peut être très coûteux et, dans certains cas, irréparable si le comportement et les mouvements du massif rocheux n'ont pas été pris en compte dans les projets de construction.

A.1 Gonflement et retrait des argiles rencontrées sur le site de l'hôpital universitaire

Les argiles présentes sur le site en question sont des argiles raides. Ces argiles ont tendance à gonfler en absorbant de l'eau lorsqu'elles sont déchargées et mises en présence d'eau. Le gonflement occasionné peut conduire à deux types de problèmes pour les fondations et les structures. Il s'agit des pressions de gonflement exercées sur des fondations et de la diminution de résistance des argiles. Lorsqu'une fondation est au contact d'une argile soumise à des cycles gonflement-retrait par suite des fluctuations du niveau de la nappe phréatique, elle peut subir des désordres et mouvements importants.

Ces argiles gonflables sont essentiellement composés de minéraux de montmorillonite et ont une teneur en humidité moins forte. Lorsque les conditions ambiantes changent, habituellement elles se gonflent ou exercent de fortes pressions sur les structures rigides; mais elles peuvent également présenter un fort degré de reversité retrait-gonflement avec modifications de la teneur en humidité. Les argiles gonflantes ont généralement un fort pourcentage de fraction argileuse et un indice de plasticité élevé, comme le montre la figure suivante.

¹ Association des consommateurs pour la qualité dans la construction

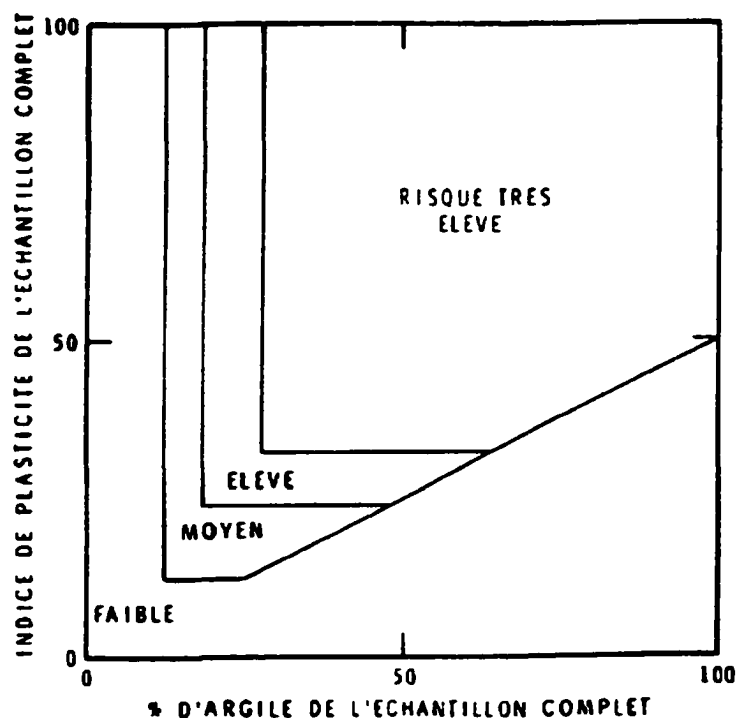


Figure A.1 Importance des dommages dus au changement de volume des sols argileux [HAMILTON, 1977].

Un sol ayant une teneur en argile supérieure à 25 pour cent et un indice de plasticité supérieure à 30 pour cent est susceptible d'un très grand risque de retrait-gonflement. Tout sol ayant une teneur en argile et un indice de plasticité supérieur à 10 pour cent peut subir au moins un léger gonflement à un léger retrait lorsque les conditions ambiantes changent.

Les mouvements résultant du retrait ou du gonflement d'un sous-sol argileux peuvent avoir des origines diverses. Les sols argileux à grains fins sont sujets à des contraintes extrêmement fortes dues au dessèchement par l'air ou la végétation. Les effets des changements cycliques ou à long terme sur la teneur en humidité, la température et la chimie se combinent souvent aux contraintes et aux sollicitations auxquelles le sol est soumis (HAMILTON, 1977). Le temps, la végétation et les variations climatiques sont des facteurs naturels importants qui modifient la portée et l'activité à l'intérieur de la zone active. La chaleur rentre et sort d'un bâtiment, et le drainage du sous-sol et l'irrigation de surface peuvent causer des changements marqués dans la teneur en humidité, le volume ou les contraintes dans un sol (CROCKER, 1962; WILLIAMS, 1974, PENNER, 1964).

Les sols riches en argile présentent souvent des problèmes à long terme lorsqu'ils sont utilisés comme remblai. Leur consistance en mottes et leur nature cohérente résultant de techniques d'excavation courantes rend difficile, sinon économiquement et pratiquement impossible, leur recompactage à une teneur en humidité et une densité uniforme qui assurera un tassement futur minimum, un gonflement possible minimum ou des poussées latérales des terres minimales. Au-delà

des problèmes évidents de tassements superficiels importants et prolongés, les remblais d'argile exigent des ouvrages de retenue singulièrement plus forts, comme des murs de fondation, pour supporter les pressions horizontales des terres plus importantes que celles qui sont exercées par des remblais non argileux.

A.2 Désordres causés par le gonflement du roc argileux aux bâtiments du Centre hospitalo-universitaire de Kamenge (Burundi)

Pour se rendre compte de l'état de la gravité des dommages causés à la bâtisse du Centre hospitalo-universitaire, des visites ont été menées sur les lieux aux mois de Novembre et Décembre 1999. Ces visites ont permis de constater que les désordres avaient affecté toute la bâtisse, du sous-sol au troisième niveau. Ces désordres étaient d'ordre structural et d'ordre esthétique, comme on peut le voir sur les photos montrées ci-après. La déformation des structures de la bâtisse avait entraîné la fermeture de certains locaux et des voies d'accès vers les niveaux supérieurs de la bâtisse. Sur les photos prises, on peut voir des signes indicateurs des mouvements de fondations liés à des cycles gonflement-retrait du massif rocheux sous-jacent.

A.2.1 Fissures verticales des fondations se prolongeant à la façade

Des fissures provenant des fondations et se propageant sur les murs des façades ont été observées. A certains endroits, l'ouverture des fissures est tellement grande qu'elle exerce une pression sur les tuyaux d'évacuation des eaux de la toiture comme on peut le voir sur la photo montrée ci-dessous.

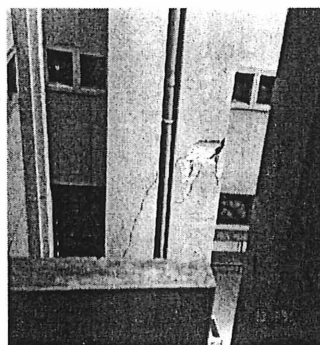


Figure A.2 Propagation des fissures sur les façades

A.2.2 Fissures au niveau des planchers des étages

Au niveau supérieur des portes et fenêtres, des fissures se sont développées parallèlement aux largeurs des portes et aux poutres séparant les étages. Cette déformation est imputée au tassement différentiel des fondations.

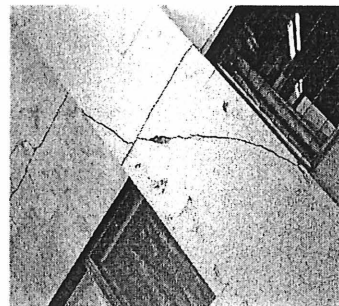
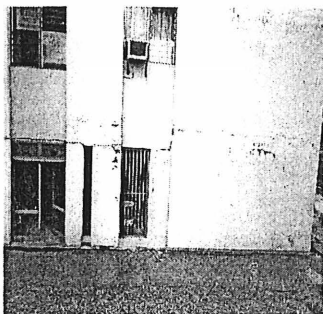


Figure A.3 Fissures profondes de béton des murs de façades

A.2.3 Fissures aux coins des portes

Les portes ont été affectées par le phénomène retrait-gonflement de sol de fondation. Cette déformation, qui a entraîné la condamnation de certaines portes, est due aux mouvements de déformation non uniforme des fondations.

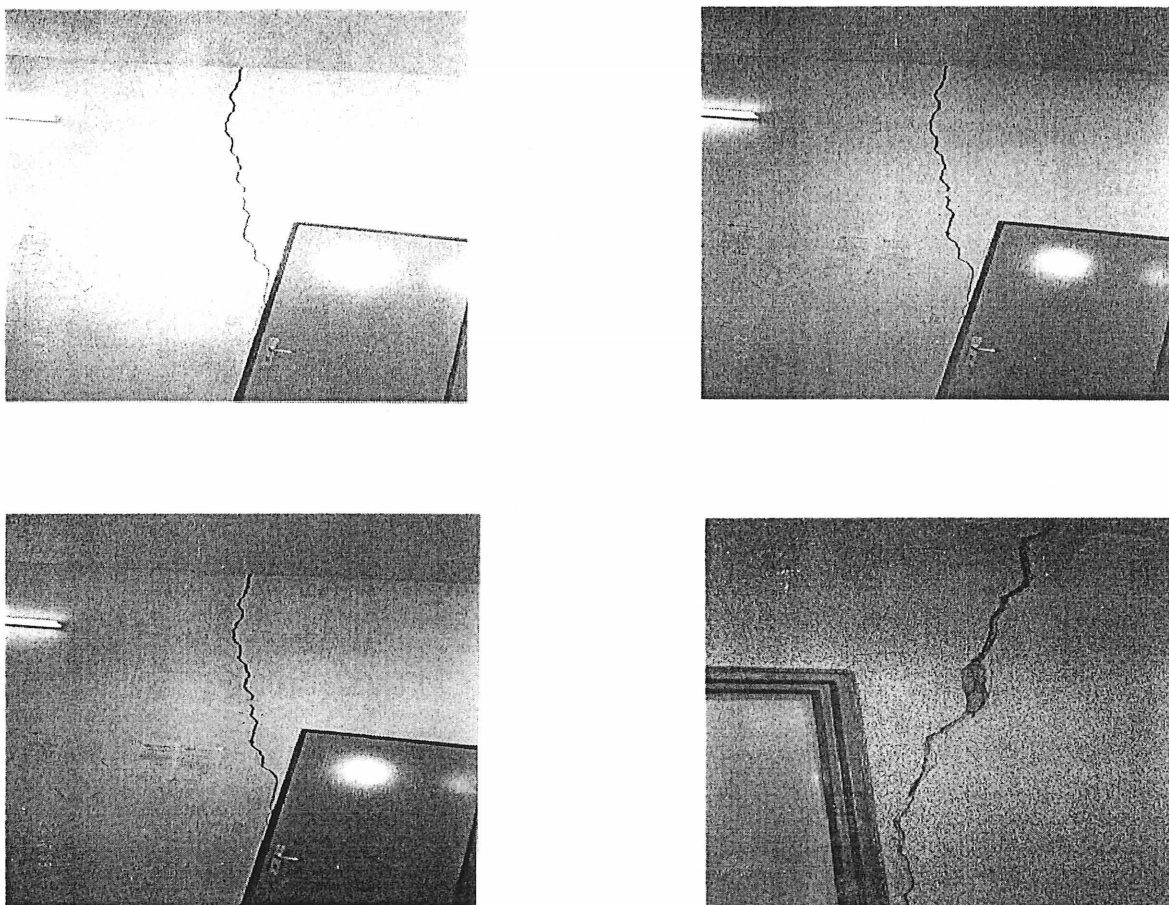


Figure A.4 Fissures aux coins des portes

A.2.4 Fissures aux murs intérieurs et aux plafonds

Les murs intérieurs et les plafonds ont été eux aussi touchés par le mouvement différentiel généré par le gonflement-retrait et dans certains cas, des déplacements horizontaux ont été observés. Les figures suivantes mettent en évidence ces désordres.

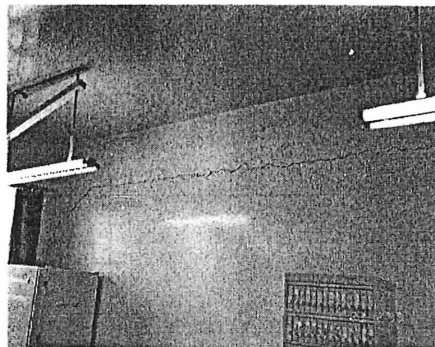
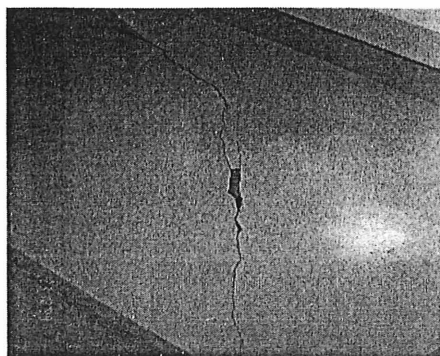


Figure A.5 Fissures aux murs intérieurs et aux plafonds

A.2.5 Ouverture des joints de dilatation (vue des façades)

Les désordres les plus fragants se sont produits au niveau des joints de dilatation, dont les ouvertures des fissures varient selon les conditions climatiques. Pendant la saison des pluies, la teneur en humidité augmente dans la masse argileuse et par conséquent le mouvement le plus dominant est dirigé de bas en haut (gonflement). Dans ce cas, il y a plus d'ouverture des fissures et cette dernière est plus accentuée dans les parties éloignées de l'origine du problème. On observe donc des fissures en V avec concavité tournée vers le bas. Par contre, pendant la saison sèche, quand l'humidité a diminué dans la masse argileuse à cause de l'évaporation, il y a une refermeture des fissures. Ces observations ont été confirmées par le service technique de l'hôpital chargé du suivi de cette problématique et elles coïncident bien avec le comportement des argiles gonflantes soumises à des variations d'humidité. Sur les photos montrées ci-dessous, on peut voir combien l'ouverture des fissures est excessive.

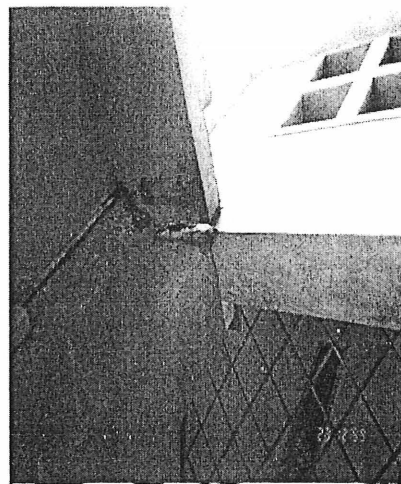
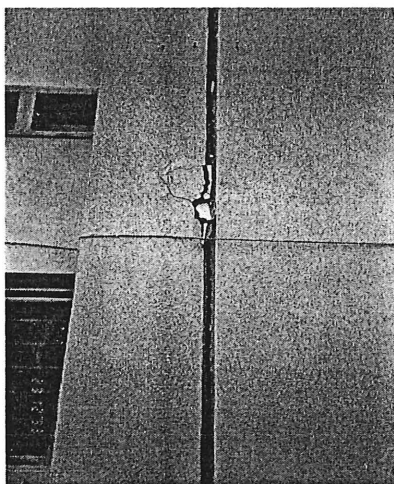


Figure A.6 Ouverture des joints de dilatation

A.2.7 Joint de dilatation thermique (vue de l'intérieur)

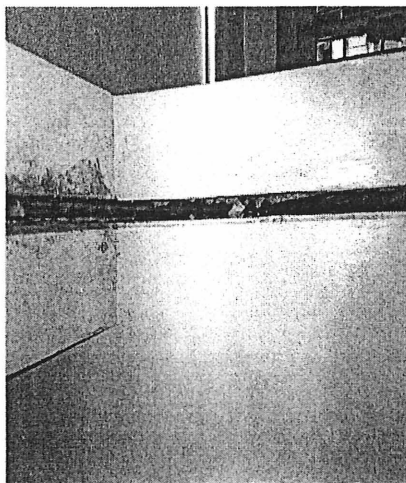


Figure A.7 Déformation des joints de dilation

A.2.8 Déformation des planchers des corridors

Sur les photos de la figure A.8, on voit qu'à la suite d'une pression ascendante excessive, le mortier de liaison s'est décollé, créant ainsi un plan de faiblesse par où se développe le mouvement de rotation des blocs en béton.

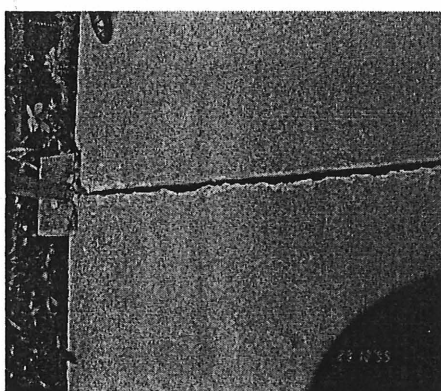
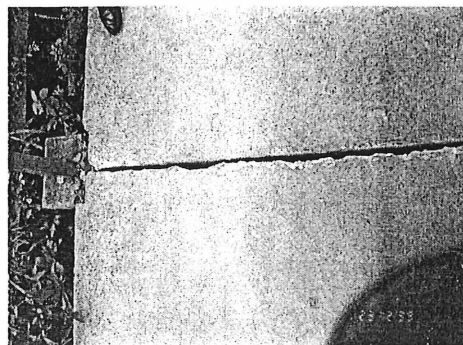


Figure A.8 Ouverture des joints de dilatation dans les corridors

A.3 Quelques pistes de solutions

A.3.1 Mesures préventives à court terme

- Contrôle de la variation d'humidité dans la masse argileuse :
 - drainage et canalisation des eaux de pluie;
 - contrôle de fuites éventuelles des eaux usées;
 - contrôle de la végétation autour du bâtiment;
- Contrôle de l'influence structurale :
 - limiter les constructions et aménagements près du site;
 - éviter la variation excessive de chaleur dans le bâtiment;
 - bon suivi du drainage du sous-sol et irrigation de surface.

A.3.2 Solutions à long terme

- **Stabilisation du site :**
 - contrôler l'infiltration verticale et horizontale.

L'asphaltage de la zone d'influence du site et l'irrigation de surface sont indispensables pour arrêter l'infiltration verticale. Quant à l'infiltration horizontale, des rideaux de palplanches autour du site et le drainage contrôlé du sous-sol peuvent être efficaces. Une fois la stabilisation faite, des travaux de réhabilitation pourraient être envisagés. Toutefois, compte tenu de l'ampleur des dégâts de la bâtisse, une étude préalable des prix devrait être faite afin de découvrir s'il faut réhabiliter le centre hospitalo-universitaire ou l'abandonner et le construire sur un autre site.

A.4 Conclusion

Les dégâts subits par la bâtisse abritant l'hôpital hospitalo-universitaire de Kamenge montrent bien que des erreurs de prise en compte des conditions géotechniques ont été commises soit dans l'étude du projet, dans l'étude du sol ou dans l'exécution des travaux.

Pour de simples fondations reposant sur un mauvais terrain (cas de l'hôpital), une reconnaissance plus approfondie et plus coûteuse du terrain est souvent requise. Compte tenu de la problématique de gonflement et de retrait de sols argileux, il est recommandable aux autorités responsables de la planification et de la construction d'exiger des rapports sur les risques géotechniques dans les soumissions de projets de grande envergure. Ces rapports devraient contenir une évaluation des risques pour les différents ouvrages et des recommandations sur les pratiques de conception et de construction les plus appropriées pour assurer une sécurité à long terme.

ANNEXE B

PROJET DE NORME "EGUS"

B NORME PROVISOIRE *EGUS*¹

B.1 Objet et domaine d'application

La présente méthode décrit la façon de déterminer le potentiel de gonflement des concassés contenant de la pyrite et destinés à des remblais de fondation sous dalle de béton. L'originalité de cet essai réside dans le conditionnement de l'échantillon (humidité et température) et l'introduction de populations bactériennes omniprésentes dans la nature qui agissent comme catalyseurs de la réaction.

L'essai est exécuté sur un matériau passant le tamis de 20 mm dans un moule CBR et tenant compte du remplacement du retenu sur le tamis de 20 mm (selon la norme BNQ 2501-255-M-86, section 1.3, 1.4).

Les descriptions concernant l'appareillage, la préparation de la culture bactérienne, le suivi de l'expansion sont données dans l'annexe B du présent mémoire.

B.2 Appareillage

B.2.1 *Moules*

Deux sortes de moules sont utilisés (Fig.B.1) :

- ♦ Moule métallique dont les dimensions et la capacité sont spécifiées dans la norme BNQ 2501-255-M-86 (section 4.1);
- ♦ Moule en PVC rigide conforme aux dimensions du moule CBR, fabriqué dans les ateliers de l'Université de Sherbrooke.

La raison principale pour utiliser le moule CBR est que ce dernier est déjà normalisé dans les normes ASTM et BNQ.

B.3 Mode opératoire

B.3.1 *Compaction*

- ♦ L'échantillon est compacté à 100% de l'énergie Proctor modifié selon la norme BNQ 2501-255. Compacter l'échantillon en cinq couches avec 56 coups par couche. L'idée de compacter l'échantillon avec une telle énergie était de mener l'essai dans les conditions les plus défavorables. Durant le compactage, le moule doit reposer sur une base pratiquement horizontale (Fig. B.3, B.4, B.5, B.6, B.7, B.8)
- ♦ Enlever le collet, araser soigneusement le matériau au niveau du moule avec la règle et déterminer la masse de l'échantillon et du moule (Fig. B.9).
- ♦ Déterminer la teneur en eau suivant la norme BNQ 2501-170 en utilisant une portion représentative de l'échantillon se trouvant dans la hausse.
- ♦ Mettre la plaque perforée avec tiges de fixation sur la partie supérieure du moule (partie arasée) pour permettre la diffusion de l'eau du récipient vers l'échantillon par capillarité.

¹ EGUS : Essai de gonflement développé à l'Université de Sherbrooke

- ◆ Renverser le moule (Fig. B.10).
- ◆ Retirer l'espaceur avec une tige (Fig. B.11).
- ◆ Retirer le papier fin métallique servant de barrière aux grains fins vers l'espaceur.
- ◆ Mettre une plaque perforée sur laquelle est vissé un support métallique destiné à transmettre tout mouvement vertical vers le potentiomètre (Fig. B.12).
- ◆ Mettre une surcharge de 4,54 kg (anneau évidé) correspondant à une contrainte de 2,5 kPa (Fig. B.13)
- ◆ L'ensemble (moule avec accessoires) est placé dans une cuvette contenant de l'eau déionisée avec une culture bactérienne. La hauteur de l'eau dans le bac est d'environ de 2 cm correspondant à la surface de la base du moule (Fig. B.14).

B.4 Préparation de la culture bactérienne

Un volume de 125 ml de culture bactérienne essentiellement *Thiobacillus Ferrooxidans* et *Thioparus* est rajoutée dans l'eau de la cuvette. La culture bactérienne a été réalisée à partir de résidus miniers récupérés à 20 cm dans le sol dans un ancien parc d'entreposage situé en Estrie. Une quantité de 2,5 g de résidu sec est mélangé à 150 ml d'eau déionisée dans un Erlenmeyer de 500 ml contenant 1% de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ et 3 g/l de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Les suspensions de résidus ont été ensuite incubées à 175 rpm sur un agitateur rotatif (New Brunswick Scientific Co.) à $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Le pH est ajusté à $3,5 \pm 0,1$ avec H_2SO_4 puis il est mesuré à intervalles réguliers en même temps que le potentiel d'oxydo-reduction (POR) durant environ trois semaines. Le suivi est réalisé jusqu'à ce que le POR atteigne 500 mv. Cette augmentation du POR en raison de l'oxydation du Fe^{2+} en Fe^{3+} est un indicateur de la croissance bactérienne. L'accroissement du potentiel redox est toujours accompagné par une baisse du pH.

B.5 Suivi de l'expansion

- ◆ Le suivi est assuré à l'aide d'un potentiomètre relié à un système d'acquisition (voir figure sur dispositif expérimental).
- ◆ Cet ensemble expérimental est installé dans une chambre maintenue à $38^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ en présence de 100% d'humidité afin d'accroître le processus de gonflement (Fig. 5.13).
- ◆ La culture bactérienne est rajoutée dans l'eau du bac (5-10 ml) à chaque deux mois.

B.6 Calculs

On détermine le gonflement à l'aide de la relation suivante :

$$S = \frac{\Delta L}{L} \times 100;$$

où :

- S : gonflement total
 $\Delta L = L2 - L1$: variation instantanée de gonflement
 L : longueur initiale de l'échantillon (= hauteur du moule – hauteur de l'espaceur)
 L1 : longueur de l'échantillon au temps T1;
 L2 : longueur de l'échantillon au temps T2 (T2>T1)

Dans le système d'acquisition, L1 et L2 sont instantanés à T=3 secondes

B.7 Courbe d'évolution

On trace deux courbes :

- la courbe de gonflement en fonction du temps $S=f(T)$.
- la courbe de variation de température en fonction de temps $T^\circ=f(T)$.

B.8 Fin de l'expérimentation

L'expérimentation est supposée terminée lorsque le taux de variation de gonflement est stable ou lorsque l'incrément de variation de gonflement est de l'ordre de 1% du gonflement total. Si l'on veut évaluer le potentiel de gonflement total, il est nécessaire de poursuivre l'essai jusqu'à l'atteinte d'un plateau ou d'une tendance asymptotique.

L'ensemble des opérations à mener est montré ci-après.

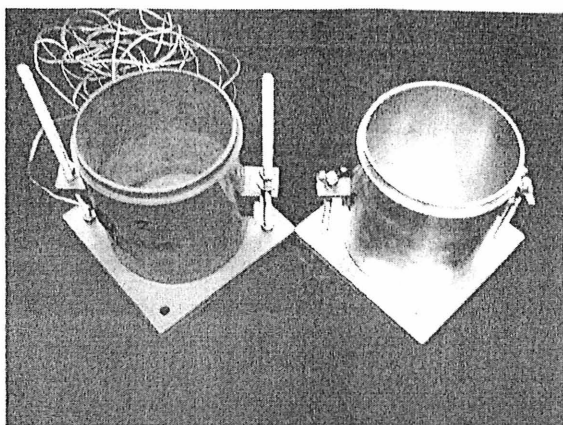


Figure B.1. Moule CBR en PVC et en métal

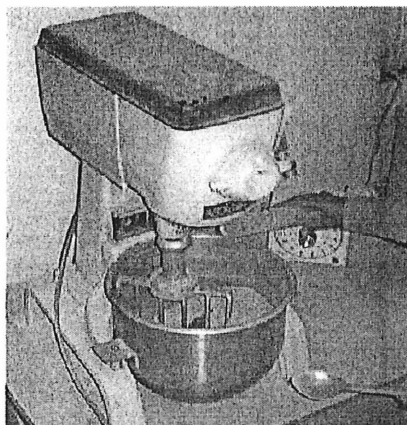


Figure B.2. Malaxage

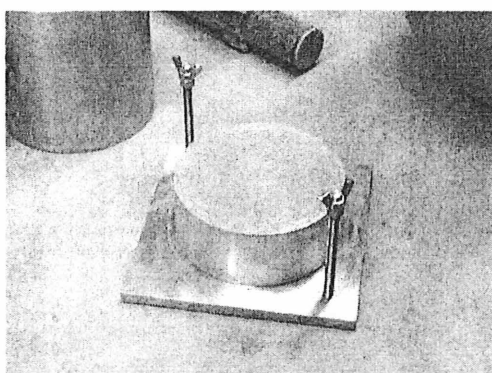


Figure B.3. Base + spacer

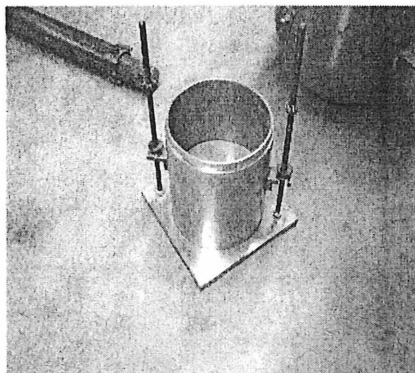


Figure B.4. Moule CBR + spacer

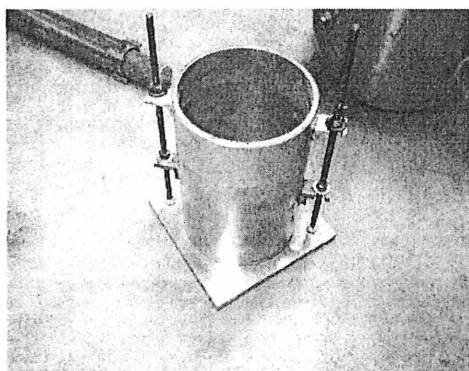


Figure B.6 Moule CBR + spacer + collet



Figure B.7 Mise en place du concassé

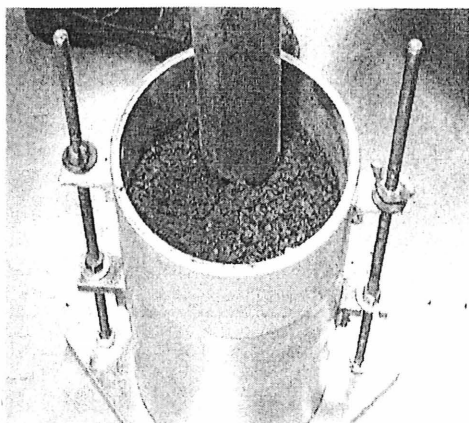


Figure B.8. Compactage Proctor modifié

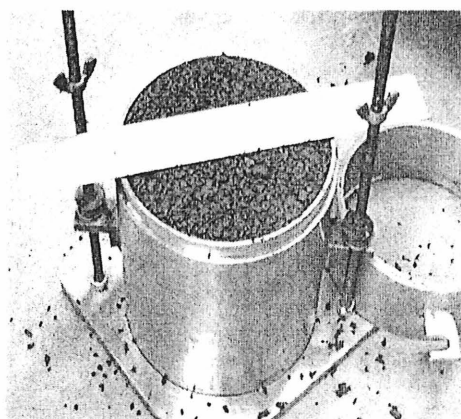


Figure B.9. Nivellement de la surface

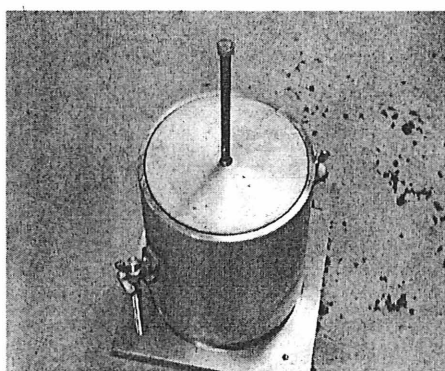


Figure B.10. Renversement du moule

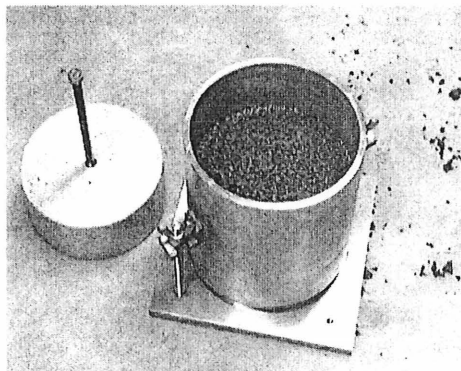


Figure B.11. Retrait du spacer

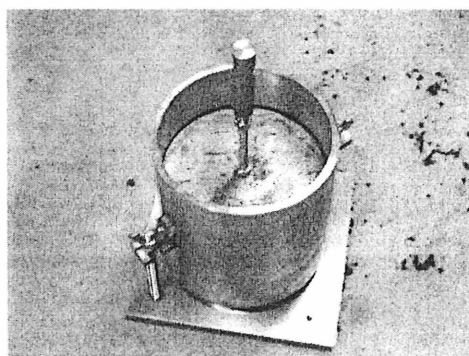


Figure B.12. Installation de la plaque perforée

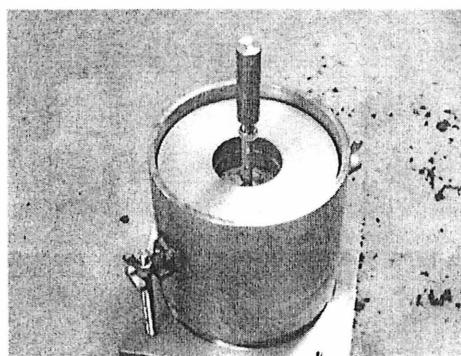


Figure B.13. Installation des charges

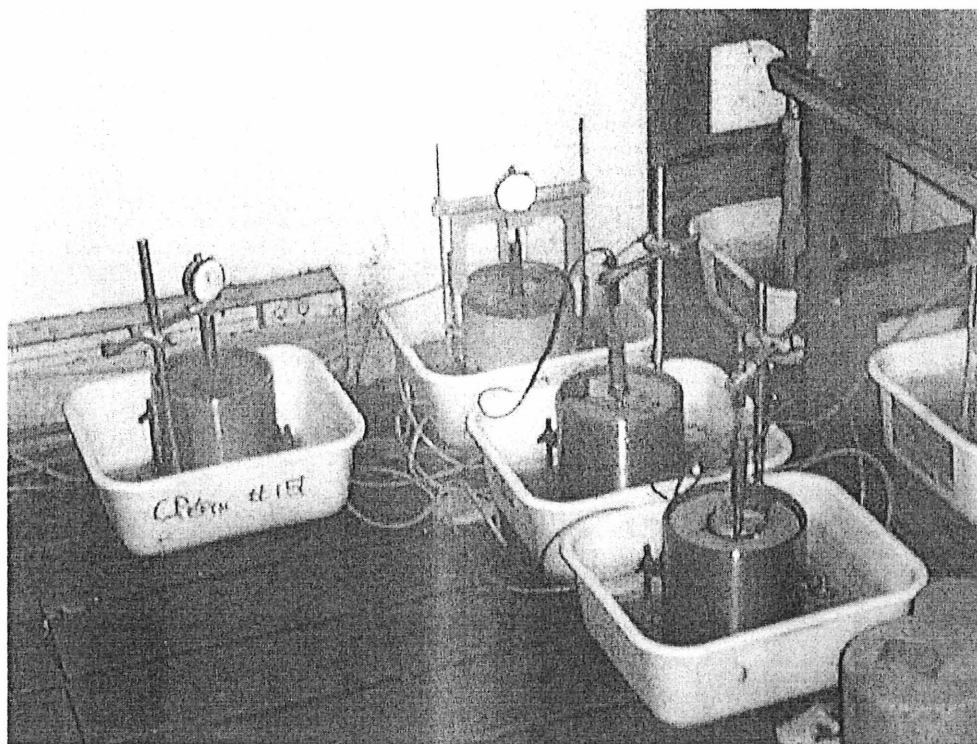


Figure B.14. Essais de gonflement en chambre humide

ANNEXE C

SPECTRES DE DIFFRACTION DES RAYONS X

ANNEXE C SPECTRES DE DIFFRACTION DES RAYONS X

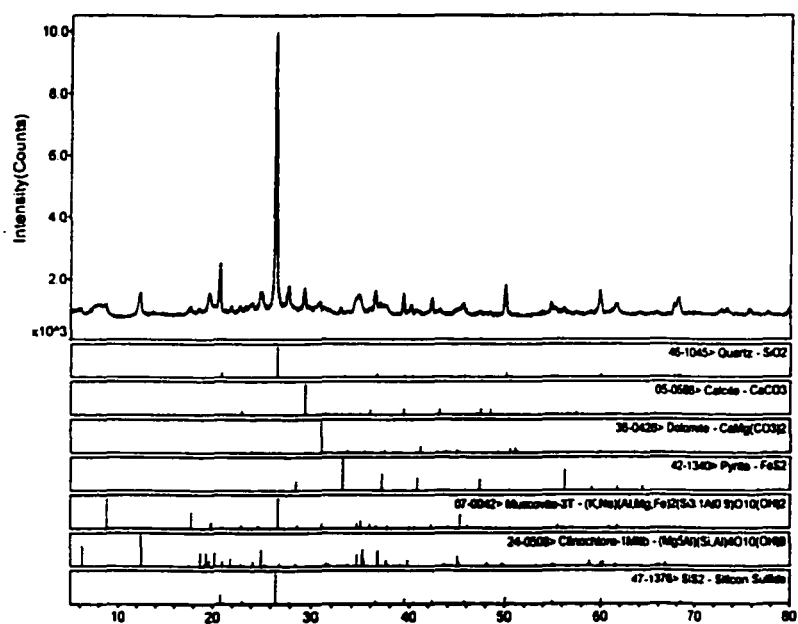


Figure C.1 Spectres respectifs de DRX de l'échantillon A

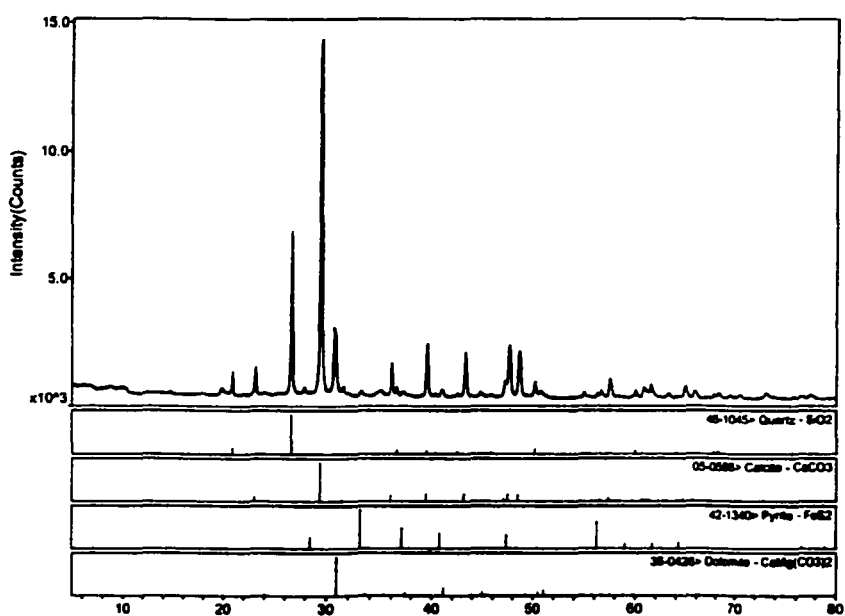


Figure C.2 Spectres respectifs de DRX de l'échantillon B

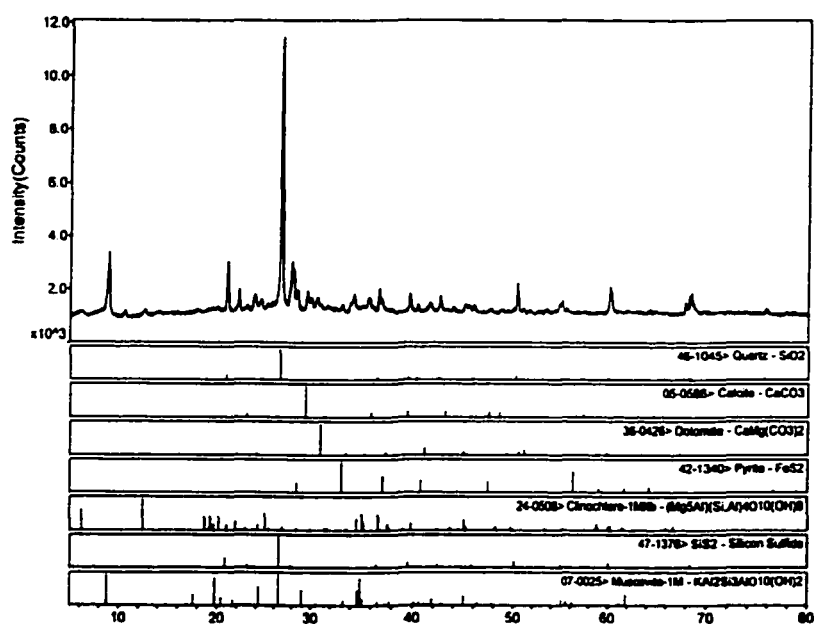


Figure C.3 Spectres respectifs de DRX de l'échantillon C

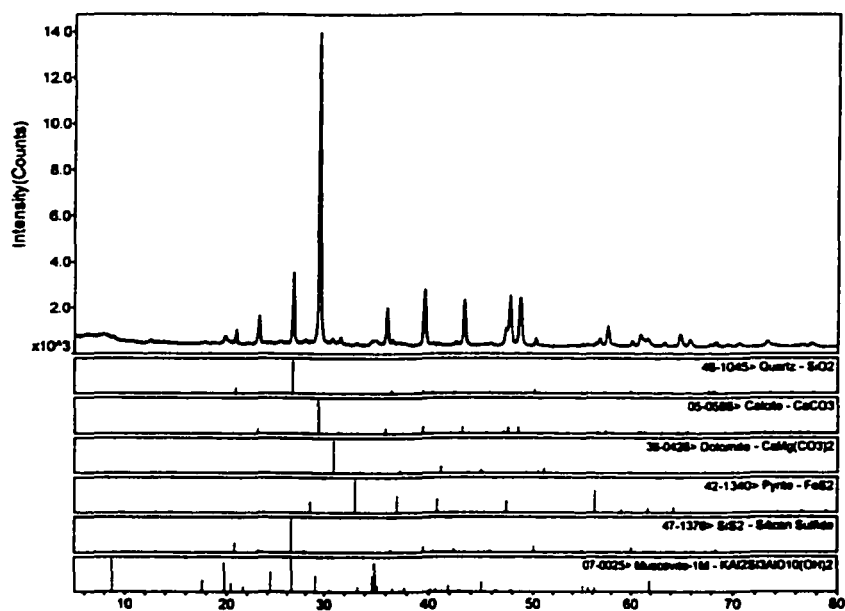


Figure C.4 Spectres respectifs de DRX de l'échantillon D

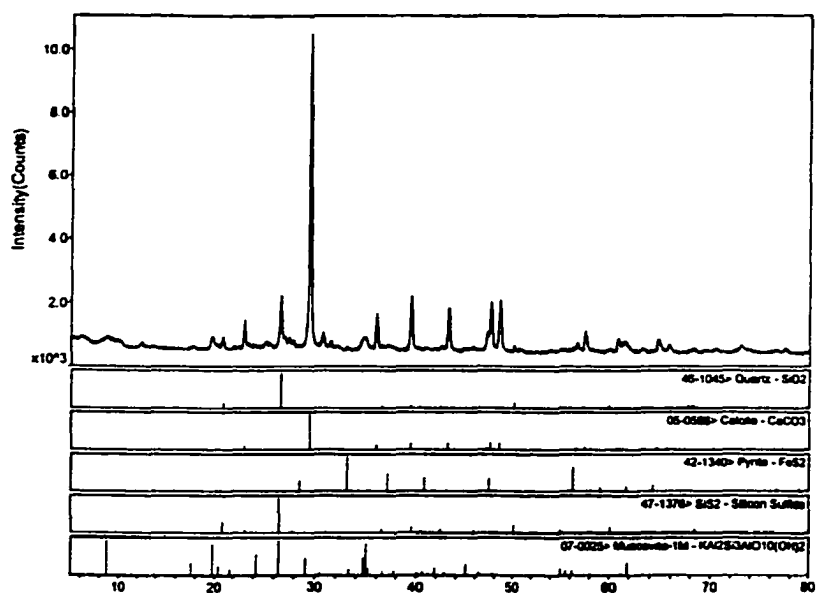


Figure C.5 Spectres respectifs de DRX de l'échantillon E

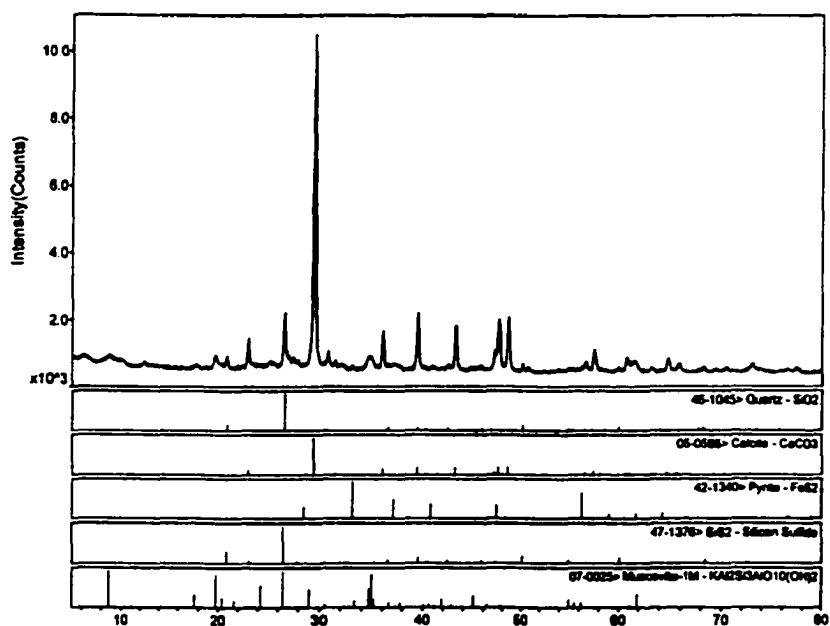


Figure C.6 Spectres respectifs de DRX de l'échantillon F

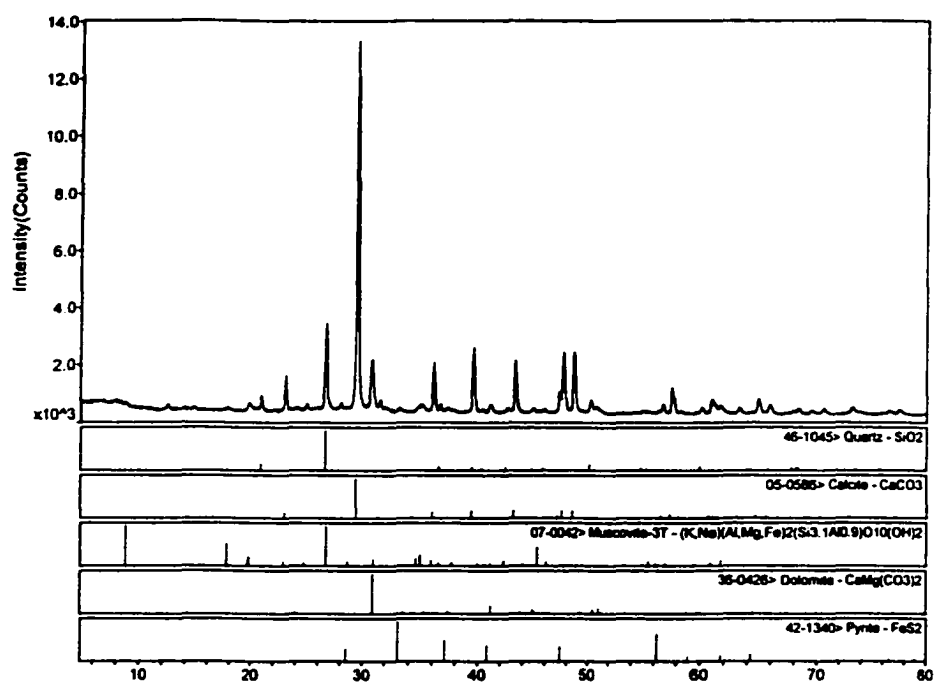


Figure C.7 Spectres respectifs de DRX de l'échantillon ME

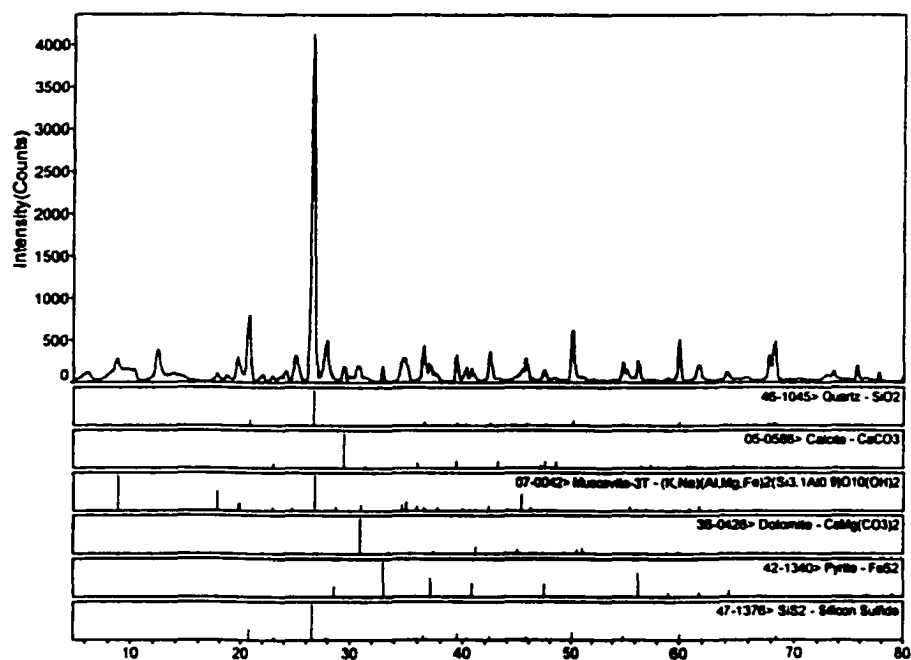


Figure C.8 Spectre de DRX de l'échantillon P

ANNEXE D

PROCÉDURE DE CARACTÉRISATION DES GRANULATS POTENTIELLEMENT GONFLANTS

Les résultats expérimentaux ont permis d'élaborer une procédure de caractérisation des granulats potentiellement gonflants. L'organigramme résumant la procédure est donné à la figure suivante; il comprend les étapes suivantes :

- Approche pétrographique

L'examen pétrographique visuel détaillé donne les informations sur l'IPPG¹⁵ et constitue la première étape de la procédure. Les résultats de cette analyse permettent de classer les granulats selon leur IPPG. Un IPPG excessivement élevé pourrait entraîner le rejet du granulat après cette première étape. Une opinion professionnelle devrait être émise.

- Microscopie optique

Cette deuxième étape concerne l'examen pétrographique en microscopie optique, les essais chimiques et les essais mécaniques. La réalisation de l'étape 2 nécessite la préparation de lames minces polies à partir des faciès potentiellement gonflants. Ici, il est très important d'avoir toutes les garanties de *représentativité* des échantillons à analyser.

Ces deux premières étapes constituent la méthodologie de caractérisation des matériaux granulaires sous la désignation de CTQ-M100, proposée par le comité technique chargé d'étudier les problèmes liés à la pyrite.

- Essai de gonflement

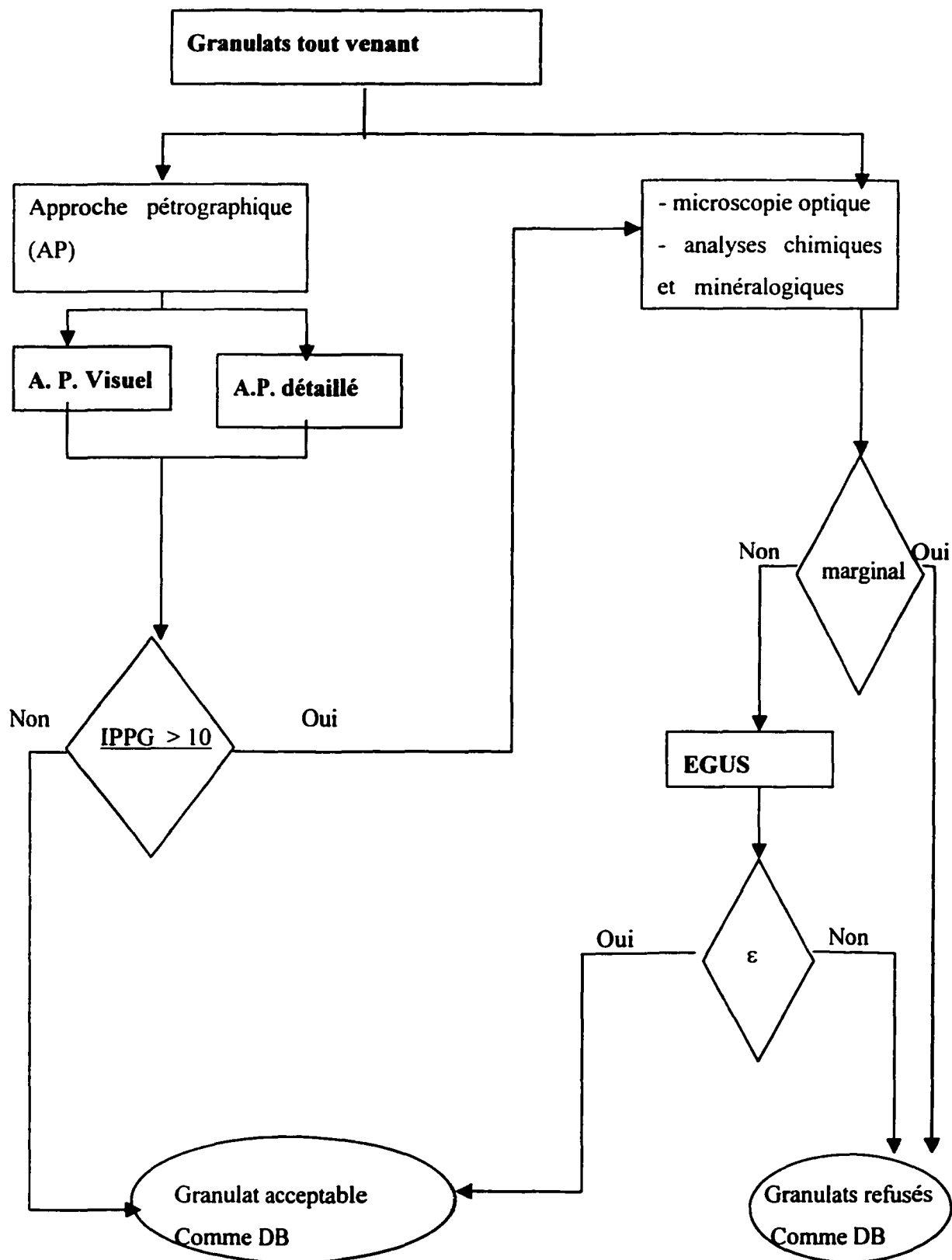
La caractérisation définitive des granulats devrait être complétée par l'essai de gonflement dont nous proposons le projet sous la désignation EGUS¹⁶. Cet essai a donné des résultats intéressants et permet l'identification complète des matériaux se trouvant dans la zone grise où seuls l'IPPG et les essais physiques et chimiques ne permettent pas leur caractérisation complète. Cela évite la pénalisation de cette catégorie de granulats par les seules analyses basées uniquement sur le nombre pétrographique. La norme proposée aura donc une énorme retombée économique et permettra une utilisation rationnelle des ressources naturelles.

Compte tenu de l'ensemble des observations réalisées en mégascopie et en microscopie optique, des résultats obtenus des essais physico-mécaniques et des analyses chimiques, de même que les résultats de l'essai de gonflement, une synthèse est émise avec les conclusions suivantes :

- granulats acceptables comme remblais sous dalle de béton
- granulats refusés comme remblais sous dalle de béton.

¹⁵ Indice pétrographique du potentiel de gonflement

¹⁶ Essai de gonflement proposé par l'Université de Sherbrooke



Organigramme de caractérisation des granulats pyriteux

Le dispositif expérimental développé par le laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée de l'Université de Sherbrooke constitue à l'heure actuelle un dispositif qui permet de mesurer l'expansion des granulats pyriteux d'une façon fiable. Toutefois, des recherches qui visent à raccourcir le délai de l'essai sont envisageables afin de mieux satisfaire les besoins pressants du moment.

D'autres recherches pourraient être orientées sur le seuil de tolérance en pyrite pour les matériaux granulaires pyriteux destinés aux remblais de fondations.

Concernant les méthodes préventives basées sur l'injection d'un coulis de ciment pour arrêter le processus d'oxydation de la pyrite, une attention particulière doit être portée à la quantité et la qualité du liant utilisé. Selon BARYLA et coll. (2000), une incompatibilité peut avoir lieu entre le fort dosage en liant et la teneur en ions sulfate et soufre déjà contenus dans les granulats. L'emploi de forts dosages en liants peut rendre les remblais traités par injection sensibles au risque de minéraux secondaires gonflants.